

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

Analýza optických prvků z Polydimethylsiloxanu (PDMS)

**Analysis of Optical Components Fabricated from
Polydimethylsiloxan (PDMS)**

2016

Bc. Adam Václavík

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Adam Václavík

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Analýza optických prvků z Polydimethylsiloxanu (PDMS)
Analysis of Optical Components Fabricated from Polydimethylsiloxan (PDMS)

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Vytvoření optických struktur z PDMS.
2. Měření propustnosti a analýza vlivu složení optických prvků z PDMS v závislosti na poměru výchozích složek.
3. Měření spektrální propustnosti optických prvků z PDMS.
4. Vyhodnocení naměřených hodnot.

Seznam doporučené odborné literatury:

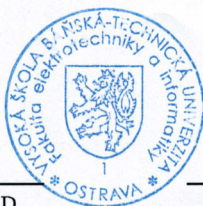
- [1] Weinert, A.: *Plastic Optical Fibers*. Siemens Verlag. Munchen 1999, ISBN 3-89578-135-5
[2] Méndez, A., Morse, T.: *Specialty optical fibers handbook*. Oxford: Academic Press, 2007, xlii, 798 p.

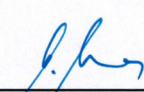
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

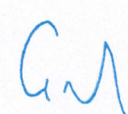
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Šiška, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016





doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 29. dubna 2016

..... 

podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Petru Šiškovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je nalezení způsobů tvorby a následné vytvoření optických struktur z Polydimethylsiloxanu (PDMS).

V praktické části jsou prozkoumány a popsány čtyři metody tvorby optických struktur. U každé metody je popsán pracovní postup, vyhodnocení z hlediska možnosti použití a následné proměření kvalitativních parametrů takto vytvořených optických struktur. Dalším krokem bylo vzájemné porovnání těchto metod. V práci je také popsán výzkum stárnutí PDMS a jeho vliv na útlum vytvořených vzorků. V dalším bodě práce je také zapsáno experimentální měření optického Splitteru vyrobeného právě z PDMS. Teoretická část práce obsahuje základy potřebné k pochopení vedení světla v optických vláknech a způsob výroby běžných optických vláken.

Klíčová slova

Polydimethylsiloxan, PDMS, Splitter, optická struktura, útlum.

Abstract

The goal of this thesis is to identify and subsequently create various optical structures of polydimethylsiloxane (PDMS)..

Four optical structures creation methods are examined and described in the practical part of the thesis. Workflow, evaluation in terms of usability and subsequent measurement of quality parameters are described for each produced optical structure. The next step was the mutual comparison of these methods. Then the aging processes of PDMS and their attenuation effect on the created samples are analyzed. The measurement of the optical Splitter made of PDMS is also examined by an experimental measurement described in another part of this work. The theoretical part contains the basic information regarding the management of light in optical fibers and manufacturing methods of conventional optical fibers.

Key words

Polydimethylsiloxane, PDMS, Splitter, optical structure, attenuation.

Obsah

Seznam použitých symbolů	- 9 -
Seznam použitých zkratk	- 10 -
Seznam ilustrací a seznam tabulek	- 11 -
Úvod.....	- 13 -
1 Optické vlákno	- 14 -
1.1 Parametry optických vláken	- 15 -
1.1.1 Útlum optického vlákna.....	- 15 -
1.1.2 Disperzní ztráty	- 17 -
1.2 Typy optických vláken.....	- 18 -
1.2.1 Jednovidová vlákna	- 18 -
1.2.2 Mnohovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu	- 19 -
1.2.3 Mnohovidová s gradientním průběhem indexu lomu	- 19 -
2 Motivace pro užívání polymerních vlnovodů	- 20 -
2.1 Základní vlastnosti POF	- 21 -
2.2 Co je to Polysiloxan.....	- 21 -
2.3 Polydimethylsiloxan (PDMS)	- 22 -
2.3.1 Mechanické vlastnosti	- 22 -
2.3.2 Větvení a zavírání.....	- 24 -
2.3.3 Způsob získávání.....	- 25 -
2.4 Polymer	- 25 -
2.5 Silicon Elastomer 184.....	- 25 -
2.5.1 Kompatibilita	- 26 -
3 Výroba optických vláken.....	- 28 -
3.1 Příprava sklovin.....	- 28 -
3.2 Tažení vláken	- 29 -
3.3 Výroba Polymerů.....	- 30 -
3.3.1 Blokova polymerace	- 30 -
3.3.2 Roztoková polymerace	- 30 -
3.3.3 Suspenzní polymerace	- 31 -
3.3.4 Emulzní polymerace	- 31 -
4 Kapilární jevy	- 32 -

5	Vytvoření optických struktur z PDMS	- 34 -
5.1	Příprava směsi	- 34 -
5.2	Tvorba optických vlnovodů pomocí injekční stříkačky	- 35 -
5.3	Tvorba optických vlnovodů pomocí gumové bužírky	- 36 -
5.3.1	Samotná výroba vlnovodu	- 38 -
5.4	Gravitační metoda.....	- 39 -
5.5	Tvorba vlnovodných ploch z PDMS.....	- 42 -
5.6	Tvorba optického Splitteru.....	- 43 -
6	Měřicí pracoviště.....	- 46 -
6.1	Konstrukční model THORLABS	- 46 -
6.2	Měřicí přístroje	- 47 -
6.2.1	Technické parametry	- 47 -
7	Praktické měření	- 49 -
7.1	Měření vzorků získaných bužírkovou metodou	- 49 -
7.2	Měření optických vlnovodných struktur	- 51 -
7.3	Měření vzorků získaných gravitační metodou.....	- 55 -
	Závěr	- 57 -
	Použitá literatura.....	- 59 -

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
A	dB	Útlum
a	dB · km ⁻¹	Útlum na kilometr
d	mm	délka vlákna
L	km	délka vlákna
M	kg · mol ⁻¹	molární hmotnost
n₁	-	index lomu jádra
n₂	-	index lomu pláště
P_{in}	W	Vstupní výkon
P_k	Pa	Kapilární tlak
P_{out}	W	Výstupní výkon
R	m	poloměr
r	m	poloměr vrchlíku
θ_{c1}	-	Mezní úhel na rozhraní jádra a pláště
θ_a	-	Úhel navázání
α_c	-	Mezní úhel šíření
σ	N/m	povrchové napětí
λ	nm	Vlnová délka

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
COF	Koeficient tření
Gbps	Gigabity za sekundu
IR	Infračervené záření
POF	Plastic Optic Fiber - Plastová optická vlákna
PS	Polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
PMMA	Polymethylmethakrylát
Tbit/s	Terabity za sekundu
UV	Ultrafialové záření

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
1.1	Struktura optického vlákna	14
1.2	Navázání paprsků do vlákna	15
1.3	Průřez jednovidovým vláknem	18
1.4	Průřez vícevidovým vláknem se skokovou změnou indexu lomu	19
1.5	Průřez vícevidovým vláknem s gradientním průběhem indexu lomu	19
2.1	Porovnání POF a skleněných vláken	21
2.2	Chemický vzorec pro PDMS	23
2.3	Chemická struktura PDMS	24
3.1	Schéma tavné technologie	28
3.2	Schéma tažení vlákna	30
4.1	Kapilární jevy	32
5.1	kapilára s topným tělískem	35
5.2	Struktura narušená vzduchovými bublinami	37
5.3	Infuzní hadička	38
5.4	Vytvořené vlákno	38
5.5	Kvalitní a nekvalitní vytvrzený vzorek	39
5.6	Improvizovaná domácí tažící věž	40
5.7	Získaný vzorek	42
5.8	Získaný vzorek	42
5.9	Vytvrzený vzorek po 12 hodinách na vzduchu	43
5.10	Vytvořený optický Splitter	43
5.11	Měření optického Splitteru	44
6.1	Sestavené měřicí pracoviště	46
6.2	Logické schéma zapojení	47
7.1	Závislost útlumu na 1m na stáří vzorku	50
7.2	Sestavené pracoviště pro měření optických struktur	51
7.3	Značně znehodnocený vzorek	52

7.4	Závislost útlumu na 1cm na stárí PDMS na vzduchu	53
7.5	Závislost útlumu na 1cm na stárí PDMS v lednici	55
7.6	Grafické zobrazení útlumu na 1m vlákna pro různé metody	56

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
2.1	Terminologie sloučenin kyslíku a křemíku	22
2.2	Vlastnosti Silicon Elastomeru 184	26
2.3	Vlastnosti Silicon Elastomeru 184	27
5.1	Časy potřebné k před-vytvrzení směsi	41
5.2	Naměřené a dopočtené hodnoty pro optický Splitter	44
7.1	Naměřené a dopočtené hodnoty pro 24 hodin starý Siloxan	49
7.2	Naměřené a dopočtené hodnoty pro 48 hodin starý Siloxan	50
7.3	Naměřené a dopočtené hodnoty PDMS stárnoucího na vzduchu	52
7.4	Naměřené a dopočtené hodnoty vzorků stárnoucí v lednici	54
7.5	Naměřené a dopočtené hodnoty pro vlákna získaná gravitační metodou	56

Úvod

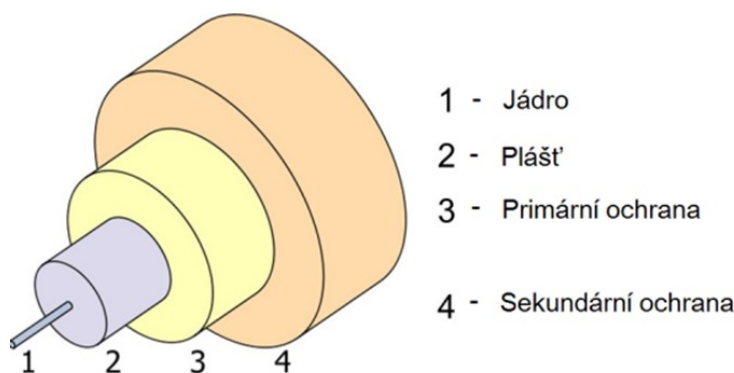
Počátek historie přenosu světla optickými vlnovody sahá hluboko do 19. století, kdy Daniel Colladon, profesor univerzity v Ženevě, demonstroval vedení slunečního světla proudem vody (o indexu lomu 1,33) vytékajícím ven z nádrže (do vzduchu o indexu lomu ~ 1) na svých přednáškách již v roce 1841. Jeho pokus se stal známým zejména v podání Johna Tyndalla, který ho v roce 1853 zopakoval v Londýně. Tohoto nově nabytého vědění se nejdříve využívalo v zábavním průmyslu v podobě světelných show. U nás je dobře známá Křižíkova fontána vybudovaná již roku 1891 na pražském Výstavišti.

Novodobá historie optických vláken je spjata s osobou Charlese Kuena Kaa. Ten v roce 1966 publikoval v Proc. IEE klíčový článek, ve kterém souhrnně popsal problematiku optického přenosu v optických vláknech. Soustředil se na problém optických ztrát a disperze a došel k závěru, že amorfní materiály, zejména křemenné sklo, jsou pro tento účel jedinečné. Již tenkrát správně odhadl přípustnou mez optických ztrát na úrovni 20 dB/km (umožňující přenést 1 % navázaného vstupního výkonu na vzdálenost 1 km) a související maximální přípustný obsah nečistot, který u kritických nečistot (např. Fe^{3+} , OH^- , Co^{2+}) nesmí přesahovat jednotky ppm (tj. deseti tisíciny procenta). V té době to byly hodnoty značně vizionářské, ale Kao se svojí úpornou celoživotní snahou přičinil o jejich realizaci. Za celoživotní dílo v této oblasti a za průlomové výsledky (základního) výzkumu přenosu světla ve vláknech byla před rokem Charlesi K. Kaovi udělena polovina Nobelovy ceny za fyziku. Společně s trojicí vědců N. G. Basovem, A. M. Prochorovem a C. H. Townesem, kteří ve stejné době položili základy moderním laserům, čímž byl položen základ moderních komunikací.[1]

1 Optické vlákno

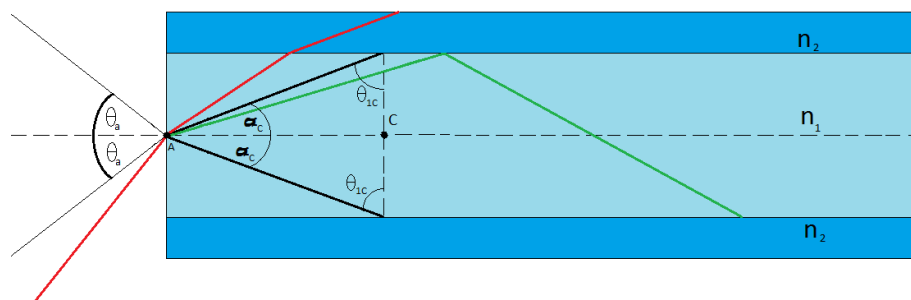
V dnešní době se optiky využívá především pro přenos informací. Jednotka informace (bit) je na fyzické vrstvě modulována a vysílána pomocí LED diod nebo laserových diod optickým vláknem k cíli.

Optické vlákno je čirý válcový dielektrický vlnovod vedoucí světlo. Hlavní důraz je kladen právě na propustnost světla materiálem. Z toho důvodu se pro výrobu optických vláken využívá převážně křemenného, chalkogeního nebo halogenidového skla, popřípadě některých krystalických polovodičů a polymerů. Vláknem vedoucí světlo je velmi náchylné na mechanické poškození, které způsobuje okamžitě jiné chování a hlavně odraz či vyvážání paprsku v inkriminovaném místě. Z toho důvodu je optické vlákno chráněno jak primární ochranou, tvořenou tvrzeným akrylátovým lakem, která zajišťuje, aby nedošlo k poškození vnitřních částí vlákna, a zvyšuje odolnost proti ohybu, tak sekundární ochranou, která zvyšuje bezpečnostní parametry vlákna. Není však bezpodmínečnou součástí všech vláken protože značně zvyšuje průměr. Strukturu optického vlákna lze vidět na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: *Struktura optického vlákna*

Světlo se obecně šíří jádrem optického vlákna, ale v případě některých vláken částečně i pláštěm. Protože vlákno nikdy nebude po celé trase dokonale rovné (ani to není žádoucí), šíří se v něm světlo pomocí odrazů, které vznikají právě na rozhraní jádra a pláště díky tomu, že obě prostředí mají rozdílný index lomu. Pro šíření musí být splněna podmínka, že jádro má index lomu větší než plášť a paprsek nesmí dopadat na toto rozhraní pod úhlem menším než je mezní úhel odrazu θ_{c1} , jinak by byl paprsek vyvážán ven do pláště a došlo by ke ztrátě výkonu (viz. Obrázek 1.2). Na obrázku je také vidět úhel α_c , který vymezuje oblast pro vedené paprsky a θ_a symbolizující úhel, pod kterým může být ještě paprsek navázán do pláště. Pokud by dopadal paprsek pod úhlem větším, vyvážal by se do pláště.[2]



Obrázek 1.2: Navázání paprsků do vlákna

1.1 Parametry optických vláken

Stejně jako v metalických přenosových cestách, tak i v těch optických, působí na paprsek fyzikální vlivy a vlivy prostředí, které ubírají paprsku na výkonu. Ve vláknech nastává znehodnocení signálu dvěma způsoby:

- Útlumem
- Disperzí

Útlum optických vláknem je jeden z hlavních vlivů, které ovlivňují procházející paprsek. Největší podíl na celkový útlum má Rayleighovo rozptyl. Dále je útlum způsobován dalšími rozptylovými ztrátami, ztrátami ohybem vlákna a Absorpcí vlákna. Všechny tyto vlivy jsou popsány níže.

Disperze ve vláknech (dle závažnosti na komunikaci) je vidová, chromatická a polarizačně-vidová. Disperzní jevy nezpůsobují ztráty energie, ale energii pouze rozprostírají v čase a mění její geometrii. Disperze je také závislá na druhu vlákna, protože například u jednomodového vlákna rozeznáváme pouze chromatickou disperzi. Disperzní jevy dělíme do několika skupin, které jsou popsány dále.

1.1.1 Útlum optického vlákna

Útlum (A) lze definovat jako logaritmický rozdíl síly signálu na konci vedení (P_{out}) proti síle signálu na začátku měřeného vedení (P_{in}) (viz. Rovnice). Pro útlum platí nepřímá úměra a to, že čím bude útlum nižší, tím lepší vlákno bude. Měrnou jednotkou útlumu je decibel (dB) vztažen na jednotku délky. Hodnota útlumu u křemenných vláken se řádově pohybuje v desetinách decibelu na kilometr. Plastová vlákna mají útlum mnohem vyšší, proto se nepoužívají pro dálkové spoje a páteřní sítě. Útlum způsobují pasivní komponenty na optické trase. Například samotné optické vlákno, kabelová spojka nebo konektor.

$$A(\lambda) = 10 \cdot \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1.1)$$

Jak již bylo zmíněno výše, útlum optických vláken je vztažen na nějakou jednotku délky. Takto vztaženému útlumu se říká měrný útlum, značí se a a je vypočítáván pomocí útlumu a délky (L).

$$a(\lambda) = \frac{A(\text{dB})}{L} = -\frac{1}{L} \cdot 10 \log \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (1.2)$$

Útlum vlákna může být způsoben rozptylem, absorpcemi a ohyby (makroohyby nebo mikroohyby).[3]

1.1.1.1 Rozptylové ztráty

Tyto ztráty jsou způsobeny rozptylem vedeného paprsku ve vlákne kvůli nehomogenitám či nečistotám vlákna, které vznikají již při výrobě. Lze je rozdělit na tři skupiny. Rayleighův rozptyl, Mieův rozptyl, rozptyl na nečistotách.

Rayleighův rozptyl – Ztráty rozptylem jsou způsobeny tím, že molekuly v amorfním (amorfni látka nemá krystalickou mřížku s pravidelnými uspořádanými částicemi - sklo, plyny a téměř všechny kapaliny) materiálu náhodně rozložené tvoří mikro nehomogenity indexu lomu materiálu. Jsou-li tyto nehomogenity a drobné nečistoty rozměrově malé proti vlnové délce, pak rozptylové ztráty na nich vznikající se nazývají Rayleighovy. Tento jev je permanentní a nedá se odstranit, pouze částečně eliminovat. Vzniká tepelnými kmity krystalické mřížky. Lze jej částečně eliminovat posunem pracovní frekvence do infračervené oblasti.

Mieův rozptyl – K Mieovu rozptylu dochází při rozptylu na větších částicích, jejichž rozměr se řádově blíží vlnové délce dopadajícího světla. Dochází k interferenci světla rozptýleného od různých částí stejné částice. V úvahu se také musí vzít i fázové zpoždění mezi světlem procházejícím různými tloušťkami rozptylující částice. Mieův rozptyl má velkou úhlovou závislost.

Rozptyl na nečistotách – Tento rozptyl je velmi podobný Mieovu rozptylu. Rozdíl je ve velikosti nehomogenit ve vlákne. Zatímco u Mieova rozptylu byly tyto nehomogenity srovnatelné s vlnovou délkou, u rozptylu na nečistotách se již jedná o „velké“ nehomogenity, větší než je vlnová délka vedeného světla. Rozptyl na nečistotách lze úplně odstranit a to správnou technologií výroby vlákna.[4]

1.1.1.2 Absorpce

Jedná se o jev, kdy se elektromagnetická energie ve vlákne mění na energii tepelnou. Absorpce se dále dělí na absorpci vlastní a nevlastní (příměsovou).

Vlastní absorpce spočívá v pohlcení části optického záření vlastními molekulami materiálu optického vlákna (SiO_2). Také se zde dají zařadit absorpce v infračervené oblasti a ultrafialové oblasti. Absorpce skleněným materiálem jsou velmi malé. Absorpce v UV oblasti je větší, způsobena absorpcí valenčními elektrony. Jedná se o zatím neodstranitelný problém z hlediska technologie výroby. Absorpci v infračervené oblasti způsobuje kmitání celých molekulových útvarů. S touto absorpcí se dá

již částečně manipulovat – pokud jsou molekulové útvary těžší, světlo je nedokáže rozkmitat. Toho se využívá při posunutí IR absorpce k nižším vlnovým délkám.

Nevlastní absorpce je způsobena pohlcením části optického záření molekulami nečistot, které do vlákna pronikly při jeho výrobě. Nevlastní absorpce jsou zaviněny přítomností iontů kovů Fe, Cu, Cr a vody ve skle optického vlákna, které mohou vniknout do materiálu vlákna při výrobě a taktéž v důsledku špatně provedené vnější ochrany. U kvalitnějších skel musí být koncentrace iontů nižší než 10^{-9} pro ionty kovů a než 10^{-7} pro ionty vody.[2][3]

1.1.1.3 Ztráty ohybem vlákna

Velmi důležitou vlastností optických vláken je jejich citlivost na ohyby, která se projevuje nárůstem útlumu vlákna. Při ohybu vlákna dochází ke změně úhlu šíření a dochází tak k porušení podmínky totálního odrazu. Ohyb vlákna je významný také z hlediska detekce a lokalizace potenciálních poruch ve vláknech. V místě ohybu je optické vlákno daleko náchylnější na poškození, protože na vnitřní straně vlákna dochází k tlaku a na vnější straně dochází k tahovému napětí. Důsledkem ohybu je změna indexů lomu v jádře a plášti. Rozlišujeme dva druhy ohybových ztrát.

Mikroohybové ztráty - Jsou malé chyby v geometrii vlákna. Jejich zakřivení je menší než je průměr jádra optického vlákna a vznikají již při výrobě vlákna a také působením vnějších vlivů, které působí deformativně na plášť vlákna a způsobují tak pouze nepatrný ohyb. Důsledkem toho některé paprsky (vidy) poruší podmínku totálního odrazu a jejich energie je vyzářena do pláště. Amplituda mikroohybů bývá okolo 1 μm a opakovací perioda kolem desítek mm. Protože se mikroohyby vyskytují po celé délce optického vlákna, výrazně ovlivňují jeho útlum. Jejich výskyt je náhodný a je zkoumán statistickými metodami.

Makroohybové ztráty - tyto ztráty vznikají při instalaci optických vláken do optických tras. Při pokládce je třeba dbát doporučení, aby vlákno nebylo zakřiveno pod určitou mez poloměru křivosti, typicky se uvádí minimální poloměr ohybu optického vlákna 60mm. Velikost útlumu optického vlákna způsobeného ohybem závisí obecně v první řadě na velikosti průměru ohybu, kterému je vlákno vystaveno. Důsledkem takového makro ohybu je část energie vyzářena ven z jádra. Velikost útlumu závisí na použité vlnové délce. S vyšší vlnovou délkou roste i útlum vlákna. Snížení útlumu lze docílit změnou vlnových délek nebo používat optická vlákna s velkou hodnotou relativní změny indexu lomu.[5]

1.1.2 Disperzní ztráty

Disperzní ztráty jsou příčinou zkreslení přijímaného signálu. Vlivem disperze dochází ke zpoždění impulsů a změně jejich tvaru. Je způsobena různým lomem světla a různou rychlostí světla v daném prostředí. Je definována jako rozdíl šířky impulsu na konci a začátku optického vlákna. Stejně jako rozptylové ztráty se i disperzní dělí na několik podskupin.[2]

Vidová disperze – V důsledku vidové disperze je omezena mezní šířka pásma či přenosová rychlost. Disperze vzniká pouze u mnohovidových optických vláken, ve kterých se šíří více vidů současně. Každý takový vid dorazí díky rozdílnosti délek drah na konec vlákna v rozdílných časech. Výsledný impuls získaný z jednotlivých paprsků se liší tvarem i amplitudou od impulsu vstupního. Tento jev se projevuje při přenosu dat na větší vzdálenosti a omezuje počet impulsů, které mohou být za určitý čas do vlákna vyslány. Vyšleme-li do vlákna řadu obdélníkových impulsů, bude na jeho

výstupu řada širších výstupních impulzů o zmenšené amplitudě, které se navzájem překrývají. Vidová disperze je zmenšována uspořádáním vlákna, zejména používáním vláken s gradientní změnou indexem lomu. U jednovidových vláken vidová disperze zcela odpadá.

Chromatická disperze – Ideální zdroj záření je monochromatický. Toho ovšem v praxi nelze dosáhnout a vyzařované optické záření obsahuje určité spektrum vlnových délek. Každá tato složka má pak ve vlákne odlišnou rychlost šíření. S vlnovou délkou se mění i index lomu, to způsobí, že na konec vlákna dorazí jednotlivé spektrální složky v jiném časovém okamžiku. To znamená, že výstupní signálový pulz je roztažen a může tak zasahovat do vedlejších bitových mezer a dojde tak ke zkreslení dat.[6]

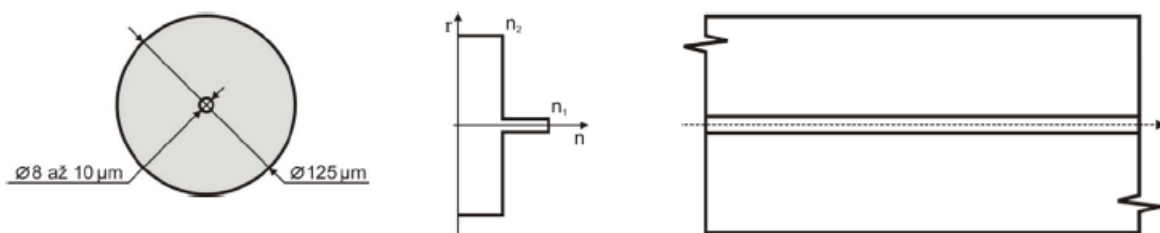
Polarizační disperze - Projevuje se převážně u jednovidových vláken, kdy jediný vid šířící se vláknem se vlastně šíří ve dvou navzájem kolmých rovinách. V tu chvíli, jakákoliv nesymetrie vlákna způsobena ať už při výrobě nebo tlakem na vlákno, způsobí šíření obou polarizací jinou rychlostí a tedy rozšíření impulzu nebo zkreslení signálu. Tento parametr se stává důležitým v souvislosti s růstem přenosové rychlosti nad 2,5 Gbps.[3]

1.2 Typy optických vláken

Základní třídění vlákna vychází z jeho konstrukce, množství vedených vidů a způsobu vedení vidu ve vlákne. Podle množství vidů můžeme dělit vlákna na jednovidová a mnohovidová. Dále lze dělit mnohovidová vlákna podle způsobu vedení vidu na mnohovidová s gradientním průběhem indexu lomu a mnohovidová se skokovým indexem lomu. Každý typ optického vlákna má různé parametry a je tedy vhodný pro jiné specifické použití. Kromě numerické apertury, jsou pak další parametry (útlum a disperze), které omezují přenosové schopnosti optických vláken.

1.2.1 Jednovidová vlákna

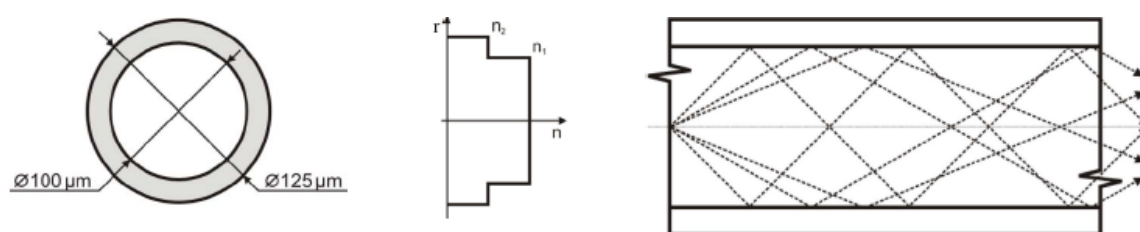
Pro nasazení optických vláken na velmi dlouhé vzdálenosti, typicky desítky km, bylo nutné vyvinout vlákno, které má velmi malé útlumy. Toho lze dosáhnout zmenšováním rozdílu optických vlastností dvou prostředí, na jejichž rozhraní dochází k odrazům, nebo zmenšováním průměru jádra optického vlákna. Jednovidová optická vlákna mají jádro o velmi malém průměru, typicky 9 mikrometrů a plášť 125 mikrometrů. Důsledkem tohoto zmenšení je pak ve vlákne veden pouze jeden světelný paprsek. Pro jeho generování je potřeba dražších generátorů, převážně se používají laserové generátory. Tím také roste cena za pořízení jednovidového vlákna. Průřez optickým jednovidovým vláknem lze vidět na obrázku 1.3.



Obrázek 1.3: Průřez jednovidovým vláknem

1.2.2 Mnohovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu

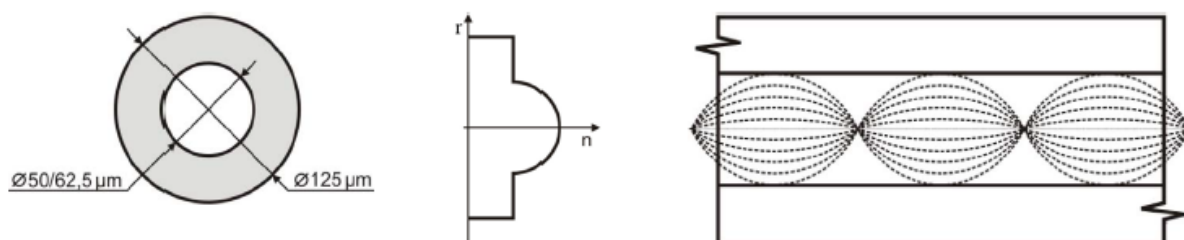
Název vlákna vychází ze schopnosti vést ve vlákne několik vidů (paprsků) zároveň. Aby se daly paprsky od sebe oddělit, vstupují do vlákna každý pod odlišným úhlem a také se pod jiným úhlem odráží. Každý paprsek tak urazí ve vlákne jinou vzdálenost a na detektor dorazí v jiný časový okamžik. To způsobuje již zmíněnou disperzi, tedy zkreslení přijímaného signálu roztažením pulzu v čase. Toto zkreslení samozřejmě nesmí přerůst přes určitou maximální mez, jinak nebude detektor schopen správně rozpoznat obdrženou informaci. Z tohoto důvodu mají mnohovidová vlákna jen omezený dosah a používají se jen na krátké vzdálenosti typicky dva kilometry. Průměr jádra mnohovidových vláken je výrazně větší než u jednovidových vláken (50-2000 μm), což garantuje menší výrobní cenu a snadnější manipulaci a vystačí si jen s poměrně jednoduchými a lacinějšími generátory a detektory. Šíření vidů v mnohovidovém vlákne lze vidět na obrázku 1.4.



Obrázek 1.4: Průřez mnohovidovým vlákem se skokovou změnou indexu lomu

1.2.3 Mnohovidová s gradientním průběhem indexu lomu

Jsou vlákna s postupnou změnou indexu lomu. To znamená, že ve vlákne neexistuje přesné rozhraní mezi jádrem a pláštěm, obě skloviny jsou v sobě rozpuštěny. Tím je dosaženo gradientního profilu indexu lomu. Dalším specifickým znakem gradientního optického vlákna je, že paprsek se zde nešíří pomocí totálního odrazu, ale díky ohybu světla. Vlákno se využívá pro vlnové délky 850 a 1 300 nm. Tato vlákna částečně potlačují módovou disperzi, proto mohou být nasazována na vyšší přenosové rychlosti a používají se zejména v datových sítích. Způsob šíření vidů ve vlákne lze vidět na obrázku 1.5.[7]



Obrázek 1.5: Průřez multimodovým vlákem s gradientním průběhem indexu lomu

2 Motivace pro užívání polymerních vlnovodů

V oblasti elektrotechniky se staly elektronické vysokorychlostní systémy téměř základní potřebou každodenního života každého z nás. S cílem udržet krok s touto rychle se vyvíjející technologií je vynaloženo úsilí na rychlejší elektronické systémy. Nicméně, technologický výsledek není dostatečný vzhledem k nevýhodám, přisuzovaným elektrickým propojením, jako je ztráta signálu, přeslechu mezi sousedními linkami apod. Zvláště u internetových switchů příští generace a high-end počítačů se očekává zpracovávání agregační rychlosti přenosu dat v řádu Tbit/s. Datové rychlosti individuálních linek pak v řádu 10 až 40 Gbps. Pro překonání zjevných problémů s vysokou rychlostí u elektrických signálů, může být jedním z řešení přenos dat pomocí optických vlnovodů. Systémy s optickými vlnovody zvyšují datové rychlosti až do Gbps s vysokou integritou signálu a nízkou úrovní šumu. Současné překonávají výše uvedené nevýhody, vlastní elektrickému přenosu signálu.

Dnes se pro přenos optického signálu používají křemenné optické vlnovody, které se dělí na jednovidové a mnohovidové a závislosti na počtu vedených paprsků. Průměr jednovidových vláken je od 4 μm v jádře vlákna a 125 μm v plášti. Označení takovýchto vláken je pak 4/125 μm . Není to však jediný používaný rozměr, nejčastěji se užívají vlákna o rozměru 9/125 μm . Standardní mnohovidová optická vlákna mají rozměry 50/125 μm a nebo 62,5/125 μm . Mnohovidová vlákna se vyrábějí také v rozměrech 100/110 μm , 200/230 μm , 500/550 μm apod. jejich nasazení v optických přenosových cestách je však minoritní. Přenos optického signálu probíhá zpravidla v okolí pracovní vlnové délky 850 nm, která se nazývá prvním telekomunikačním oknem. Systémy využívající první telekomunikační okno jsou určeny pro méně náročný přenos dat, a to jak po ekonomické, tak i technické stránce, který probíhá na kratší vzdálenosti s nižším objemem přenášených dat. Naopak pokud potřebujeme přenášet velké objemy dat, například v páteřních sítích, používají se vlnové délky druhého telekomunikačního okna o hodnotě vlnové délky 1310 nm, kde mají křemenná optická vlákna nejmenší disperzi. Pro tyto páteřní sítě se užívá také třetího telekomunikačního okna, které má vlnovou délku 1550 nm. Zde mají křemenná vlákna nejnižší optický útlum. V současnosti je snaha posunout přenos dat také mimo tato tři optická okna a využít pro přenos dat celé přenosové pásmo.

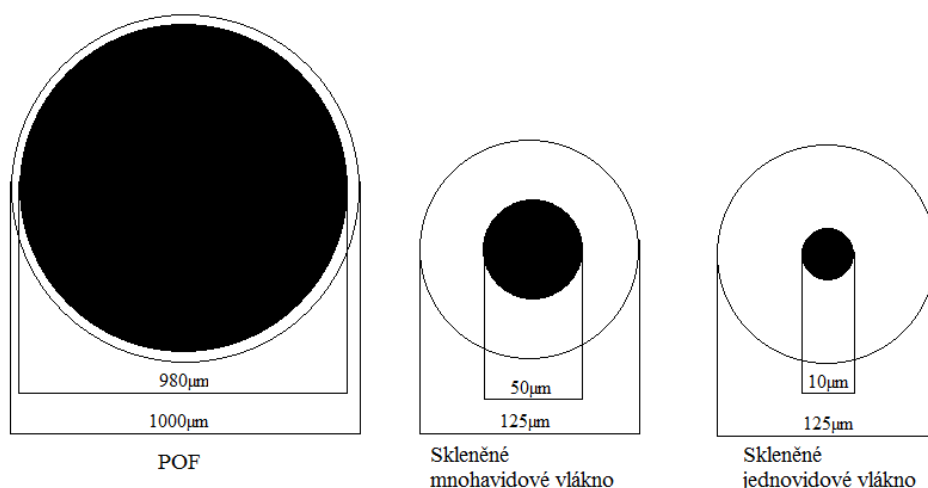
Cílem optických vláken je však plně nahradit metalické cesty, tudíž i na velmi krátké vzdálenosti. Zde se postupně upouští od mnohovidových křemičitých vláken a stále více se začínají využívat pasivní polymerní multimódové vlnovody, např. polymerní optická vlákna (POF), která vykazují nejnižší vnitřní absorpční ztráty ve spektrální oblasti 600- 900 nm. V současné době je velmi atraktivní jejich integrace do běžných desek plošných spojů (DPS), z důvodu jejich potenciálu pro snadnou výrobu při nízkých nákladech. [8].

U metalických přenosových médií bude v blízké budoucnosti vyčerpána přenosová kapacita (objem přenášených dat), respektive přenosová rychlost. Optické vlákno poskytuje moderní a vysoce účinnou výkonovou alternativu, která umožní rychlý přenos datových souborů při mnohonásobně větších objemech. POF vlákna mohou být velice vhodná alternativa zejména pro domácnosti a kanceláře.[9]

2.1 Základní vlastnosti POF

Oproti klasickým křemíkovým optickým vláknům, je velikost jádra POF v některých případech až 100 krát větší. Jádro je vyrobeno z (PMMA) – známější jako plexisklo nebo akrylátové sklo s indexem lomu 1,49 (v některých případech 1,59). Plášť je z fluorovaných polymerů a index lomu je 1,46. Polymerová optická vlákna mají obvykle průměr 1000 μm , jádro tvoří 980 μm . Kvůli většímu průměru jsou vlákna schopna provádět přenos, i když jsou konce vláken zničené nebo znečištěné.

POF je dále imunní vůči posunutí či silným vibracím a proto mohou být instalovány v náročnějších průmyslových prostředích. Jak již bylo zmíněno výše, nejsou vhodná pro přenos na větší vzdálenosti kvůli velkému útlumu (10 až 200 dB/km). Skleněné vlákno má při vlnové délce 1310 nm útlum 0,2 dB/km. Proto se POF používají přibližně do 100 m v domácích sítích, průmyslových a automobilových sítích nebo digitálních domácích spotřebičích. Co se týče jejich instalace, je jednodušší a levnější než u skleněných vláken. Vzhledem k vlastnostem materiálu, ze kterého jsou vyrobeny, mají vyšší mechanickou pružnost a menší kritický poloměr ohybu (cca 5mm), také jsou pružnější než jejich konkurence. Oproti skleněným vláknům převažuje u plastových vláken duplexní přenos. Porovnání POF a skleněných vláken lze vidět na obrázku 2.1.[10]



Obrázek 2.1: Porovnání POF a skleněných vláken

2.2 Co je to Polysiloxan

Polysiloxan je v té nejobširnější podstatě pouze sloučenina křemíku a kyslíku se specifickými vlastnostmi. Vzhledem k nedostatku literárních pramenů k této problematice v českém jazyce se musí čtenář uchýlovat k podkladům, nejčastěji anglickým. V anglické i české literatuře lze najít spoustu termínů pro sloučeniny křemíku a kyslíku, které mohou být ve výsledku matoucí. Je proto vhodné uvést tuto kapitolu krátkým terminologickým přehledem viz. Tabulka.

Tabulka 2.1: Terminologie sloučenin kyslíku a křemíku [11]

Český název	Anglický název	Charakteristika
Křemík	Silicon	Prvek Si
Silan	Silane	Buď SiH_4 nebo obecně sloučeniny křemíku a vodíku SiH_{2n+2}
Silanol	Silanol	Silan s alespoň jedním vodíkem vázaným substitucí s kyslíkem
Oxysilan	Oxysilane	Sloučeniny křemíku s alespoň jedním hydroxy, aryloxy nebo alkoxy substituentem
Silikát (křemičitan)	Silicate	Kyslíkaté sloučeniny křemíku. Obvykle kovové soli aniontů křemíku a kyslíku (soli kyseliny křemičité)
Silika	Silica	Písek, hydratovaný oxid křemičitý, používán zejména v gumárenském průmyslu
Siloxan (silikon)	Siloxane	Sloučenina, kde jsou 2-4 kyslíky vázané na 1 křemík
Polysiloxan	Polysiloxane	Polymer s řetězcem z kyslíku a křemíku
Silikon	Silicone	Polysiloxan s organickými substituenty na každém křemíku (obvykle 2)

Jak z tabulky vyplývá, polysiloxany jsou polymery na bázi křemíku odolné vůči UV záření, oxidaci a teplotě. Kvůli svým vlastnostem jsou považovány za vysoce odolné ochranné vrstvy. Polysiloxany tedy můžeme obecně považovat za anorganicko-organické polymery s obecným vzorcem $[\text{R}_2\text{SiO}]_n$, kde R je organický substituent (metyl, etyl, fenyl, apod.) a v jehož hlavním řetězci se díky siloxanové vazbě střídají atomy křemíku a kyslík. [11][12][13]

2.3 Polydimethylsiloxan (PDMS)

Polydimethylsiloxan (PDMS), patří do skupiny polymerních organokřemičitých sloučenin, které se běžně označují jako silikony. PDMS je nejpoužívanější organický polymer založený na bázi křemíku a je zvláště známý pro své neobvyklé reologické (neboli průtokové) vlastnosti. PDMS je opticky čistý, netoxický, nehořlavý a obecně inertní, což znamená, že nevytváří mnoho (či žádné) chemické sloučeniny. Je také nazýván Dimethicon a je jedním z několika typů silikonového oleje (polymerizovaného siloxanu). Jeho aplikace sahají od kontaktních čoček a zdravotnických prostředků přes potraviny (prostředek proti pění) až po těsnění, maziva a žáruvzdorné dlaždice.

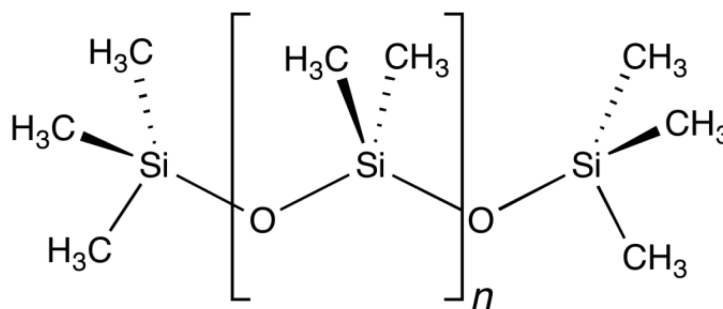
2.3.1 Mechanické vlastnosti

Polydimethylsiloxan je viskoelastický, což znamená, že při dlouhých časových úsecích (nebo vysokých teplotách) se chová jako viskózní kapalina, podobná medu. Nicméně, v krátkých dobách průtoku (nebo nízkých teplotách), působí jako elastická pevná látka, ne podobná kaučuku. Jinými slovy, je-li některé PDMS ponecháno vlivům okolních teplot přes noc (dlouhá doba toku), rozteče se

po povrchu a zakryje veškeré nerovnosti a povrchové nedokonalosti. Nicméně pokud je stejný PDMS vržen na stejný povrch v krátkém časovém úseku, odrazí se jako gumový míč.

Ačkoli viskoelastické vlastnosti PDMS lze intuitivně pozorovat pomocí jednoduchého experimentu popsaného výše, mohou být přesněji měřeny za použití dynamicko-mechanické analýzy. Tato metoda vyžaduje stanovení charakteristik materiálů v širokém rozsahu teplot, času, a deformací. Vzhledem k tomu, že PDMS je chemicky stabilní, je často používán jako kalibrační kapalina pro tento typ experimentu.

Polydimethylsiloxan (PDMS), je polymerní organokřemičitá látka s vynikající teplotní odolností, biokompatibilitou, flexibilitou a extrémně nízkou hodnotou skelného přechodu. Proto může být sloučen různými způsoby; nicméně jeho mechanické vlastnosti (modul pružnosti) jsou nízké, a to i po sloučení. Je proto zapotřebí inovačních strategií, aby se zlepšily mechanické vlastnosti; přidáním částicového plnidla je široce používán přístup k posílení polymerní matrice. Koeficient tření (COF) je další vlastnost, která vyžaduje značné zlepšení pro PDMS. Neboť zlepšení COF vede ke zlepšení v tření, opotřebení a vlastnostech buněčné adheze. PDMS má modifikovaný povrch pro vytvoření struktury s nízkým třením pro biomedicínské aplikace.[14]



Obrázek 2.2: Chemický vzorec pro PDMS

Ze schématu lze vidět, že jednotlivé methylové skupiny jsou vázány pomocí křemíku, který je čtyř vazbový k sobě. Takto svázané molekuly jsou nazývány právě dimethylem. Následným spojováním skrze molekuly kyslíku vzniká siloxan a jejich polymerací Polydimethylsiloxan.

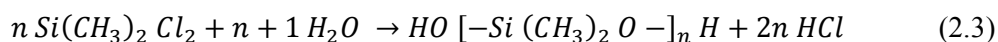
Chemický vzorec pro PDMS je:

$$(CH_3)_3Si - O - [Si(CH_3)_2 O]_n Si(CH_3)_3 \quad (2.1)$$

,kde n je počet opakujících se monomerů

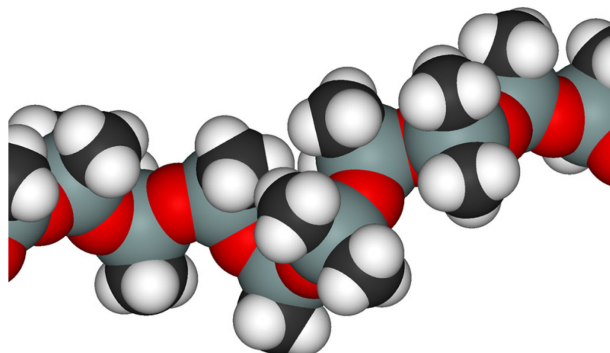
$$[SiO(CH_3)_2] \quad (2.2)$$

jednotek. Průmyslová syntéza může začít z dimethyldichlorsilanu a vody podle následující reakce:



Polymerační reakcí vznikne chlorovodík. Pro lékařské a domácí aplikace byl vyvinut proces, ve kterém byly atomy chloru nahrazeny acetáty. V tomto případě polymerace produkuje kyselinu

octovou, která je méně chemicky agresivní, než kyseliny chlorovodíkové. Jako vedlejší efekt je v tomto případě proces vytvrzování mnohem pomalejší.



Obrázek 2.3: Chemická struktura PDMS

2.3.2 Větvení a zavírání

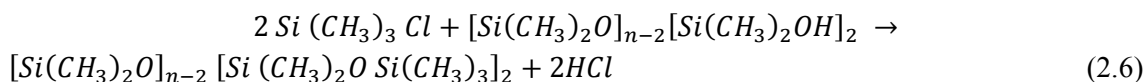
Hydrolyzou



je vytvořen polymer, který je zakončen silanolovými skupinami



Tato reaktivní centra jsou typicky limitována reakcí s trimethylsilyl chloridem:



Předchůdci Silanu s více kysle reagujícími skupinami a méně methylovými skupinami, jako jsou například methyltrichlorsilan, mohou být použity k zavedení větve nebo příčné vazby v řetězci polymeru. Za ideálních podmínek se každá molekula takové sloučeniny stává bodem větvení. Toto může být použito pro výrobu pevné silikonové pryskyřice.

Dobře definovaný PDMS s nízkým indexem polydisperzity a vysokou homogenitou je produkován kontrolovanou aniontovou polymerací hexamethylcyclotrisiloxanu. Použitím této metodologie je možné syntetizovat lineární blokované kopolymery, heteroarm ve tvaru hvězdy a mnoho dalších makromolekulárních architektur.

Polymer se vyrábí v několika viskozitách, v rozsahu od tenké tekuté kapaliny, až po hustou kaučukovitou polopevnou látku. PDMS molekuly mají zcela flexibilní hlavní řetězec polymeru (nebo řetězce) vzhledem k jejich siloxanovým vazbám, které jsou analogické s vazbami etherovými, které jsou používány pro zvýšení elasticity polyuretanů. Tyto pružné řetězce se stanou volně zapletené, když je molekulová hmotnost vysoká, což má u PDMS za následek neobvykle vysokou úroveň viskoelastivity.

2.3.3 Způsob získávání

PDMS se nejčastěji získává z oxidu křemíku, který je mimo jiné i základní surovinou pro výrobu skla, nebo z látek obsahujících polysiloxan. Polydimethylsiloxan se často užívá přímo v dodávaném stavu podobném želatině, nebo jako kapalina, obsahující 4 % až 5 % silikagelu, případně ve formě vodné emulze, která vedle silikagelu obsahuje též emulgační a konzervační přísady. Z kapalin, které obsahují silikagel, lze polydimethylsiloxan izolovat odstředěním při cca 20 000 ot./min. v odstředivé míchačce.

2.4 Polymer

Částice sestávající ze skupin atomů spojených navzájem v tak velkém počtu, že řada fyzikálních a chemických vlastností této látky se nezmění přidáním nebo odebráním jedné nebo několika konstitučních jednotek. Polymery od jiných materiálů odlišuje řetězcová struktura jejich molekul. Tím je myšlena řada propojených skupin atomů, která představuje převažující strukturní motiv. Polymery typicky vznikají polymerací nebo polykondenzací.

Polymerace je jednoduchá chemická reakce, při níž se molekuly monomeru (který musí obsahovat dvojnou nebo případně vícenásobnou vazbu mezi dvěma atomy C) spojují řetězením a výsledkem tohoto řetězení je následně polymer. Makromolekula narůstá velkou rychlostí (v řádu sekund).

Polymerace má tři stádia:

- Inicie: rozštěpení dvojně, případně vícenásobné vazby.
- Propagace: růst řetězce, vzniklý radikál reaguje s další molekulou monomeru, volný elektron se stále obnovuje na konci rostoucí makromolekuly.
- Terminace: ukončení růstu a obnovení dvojně vazby.

Dříve se jako polymery označovaly výhradně makromolekulární látky skládající se z molekul X_n (X značí strukturní jednotku, která se opakuje c molekul n-krát). V dnešní době se mluví o polymerech i u ostatních látek, jejichž molekuly obsahují velký počet vzájemně si podobných, na sebe napojených strukturních jednotek, kupříkladu proteiny nebo nukleové kyseliny.

Typickým příkladem jednoduchého polymeru může být polyetylen, jehož vzorec lze zapsat:



Jednoduchým příkladem polymeru s rozvětveným řetězcem může být přírodní kaučuk, jehož monomerní jednotkou je uhlovodík isopren nebo syntetický polystyren. Polymerní látky nemusí vytvářet pouze lineární řetězce. Mezi jednotlivými řetězci monomerních jednotek mohou vznikat vzájemné chemické vazby, vytvářející plošnou nebo i prostorovou strukturu molekul polymerů.[15][16]

2.5 Silicon Elastomer 184

Pro praktické zjištění vlastností byl použit PDMS Silicon Elastomer 184 od firmy Sylgard.

Jedná se o dvousložkovou kapalinu, ředěnou v poměru 10 ku 1. Jakmile se sloučenina velmi důkladně promíchá, vznikne flexibilní elastomer vhodný k povrchové ochraně zařízení, jako jsou například sluneční kolektory a jiné zařízení, kdy je důležité, aby jejich povrchová úprava dokonale

propouštěla sluneční svit bez znehodnocení UV záření. Není nutná jiná příprava pokrývaného povrchu, než jeho očištění. Pokud je to možné, nalévání a dávkování silikonu a činidla by mělo být prováděno za sníženého tlaku a to zejména v případě, že tekutina obsahuje mnoho vzduchových bublinek. Pokud tato technika nemůže být použita, částice by měly být odstraněny poté, co bylo nalito silikonové činidlo. Původní kapalina je vytvrzována na vzduchu i za běžné pokojové teploty 25°C/77°F. Tento jinak zdlouhavý proces lze urychlit zvýšením teploty prostředí a to až na teplotu převyšující 150°C. Tyto vytvrzovací procesy se mohou minoritně lišit napříč různými druhy elastomerů. Není vyžadován žádný dovytvrzovací proces. Proces tvrdnutí začíná již při míchání silikonu a reakčního činidla. Zpočátku je tvrdnutí prezentováno postupně se zvyšující viskozitou, následovanou gelováním a finální konverzí na pevný elastomer. Doba je definována jako čas potřebný ke zdvojnásobení viskozity po smíchání základu a reakčního činidla (též jej lze označovat jako tužidlo elastomeru). Ve většině použití je pro elastomery definována provozní teplota v rozsahu teplot -45°C až 200°C (-49°C až 392°C). Nicméně obě tyto krajní hodnoty mohou lehce kolísat v závislosti na konkrétních aplikacích a je potřeba věnovat čas dalším úvahám a dostatečnému testování pro konkrétní nasazení v praxi. Literární prameny udávají, že nasazení by mělo být možné i při teplotách v okolí -55 °C, ale výkonost směsi pak musí být ověřena v konkrétních případech. Při překračování provozních teplot směrem vzhůru (nad 200°C) je trvanlivost vytvrzeného materiálu závislá na teplotě a času. Dle očekávání, čím bude teplota vyšší a elastomer jí bude vystaven po čím delší dobu, tím bude doba, po kterou bude elastomer použitelný kratší. Viz. Zde [17]

2.5.1 Kompatibilita

Některé materiály, chemikálie, vytvrzovací činidla a změkčovadla mohou omezovat tvrdnutí přidaného tvrdidla. Za zmínku zde stojí například organické a organometalické sloučeniny, silikonový pryž, síra, polysulfidy, nenasycená uhlovodíková změkčovadla. Je-li substrát nebo materiál zpomalovačem tvrdnutí, může být v některých případech nejasné. V takovýchto chvílích je doporučováno provést test v malém měřítku.[17]

Tabulka 2.2: *Vlastnosti Silicon Elastomeru 184*

Vlastnost	Výsledek	Jednotka
Jedno nebo dvou složková	Dvou	
Barva	Bezbarvý	
Viskozita (základu)	5100	cP
Viskozita (směsi)	3900	cP
Pracovní čas při 25°C	1,5	hod.
Doba vytvrzení při 25°C	48	hod.
Doba vytvrzení při 100°C	35	min.
Doba vytvrzení při 125°C	20	min.
Doba vytvrzení při 150°C	10	min.
Objemový měrný odpor	1,2E+14	ohm*cm

Tabulka 2.3: *Vlastnosti Sylicon Elastomeru 184*

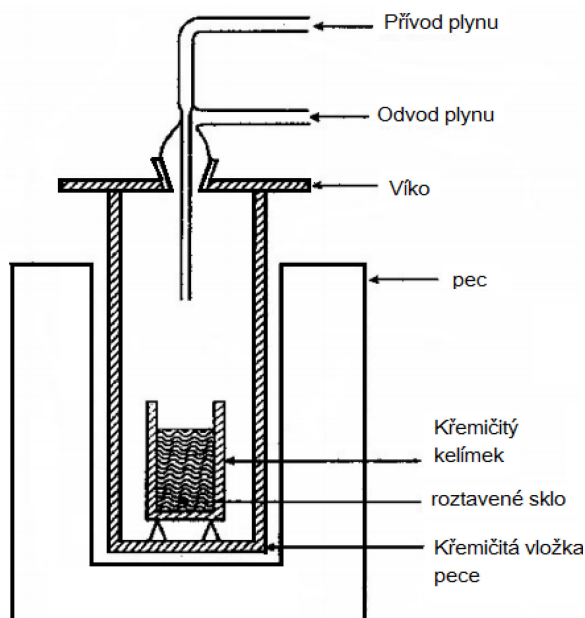
Vlastnost	Výsledek	Jednotka
Pevnost v tahu	980	PSI
	6,7	MPA
	69	Kg/cm2
Index lomu při 589nm	1.4118	
Index lomu při 632,8nm	1.4225	
Index lomu při 1321nm	1.4028	
Index lomu při 1554nm	1.3997	

3 Výroba optických vláken

Při výrobě optických vláken jsou kladeny největší nároky na zabezpečení stabilních přenosových vlastností vzniklého vlákna. Aby bylo dosaženo minimálního útlumu, je nutné, aby bylo při výrobě zamezeno styku s nečistotami, a také jsme limitováni hraničními podmínkami krystalických struktur. Tyto podmínky omezují použití materiálů na sklovité struktury a plastové monokrystalické struktury. Vzhledem k finanční náročnosti výroby optických vláken platí mezi cenou a vyrobenou délkou vlákna nepřímá úměra.

3.1 Příprava sklovin

Pro přípravu materiálu k výrobě optických vláken se používá dvou technologií. První zmiňme **tavnou technologii**, jejíž schéma je na obrázku 3.1. Jedná se o vylepšenou sklářskou technologii. Nejprve se připraví prášek ze skloviny zbavený veškerých nežádoucích prvků a to nejčastěji z materiálů SiO_2 , B_2O_3 , Al_2O_3 , K_2CO_3 , Na_2CO_3 , GeO_2 aj. Dalším krokem je vytvoření taveniny s nutnou podmínkou absence bublin. Abychom toho docílili, využíváme technologii nízkoteplotního tavení v rozmezí 900 – 1300°C. Při tomto tavení dochází ke změně indexu lomu díky změně složení a iontové výměně. Celý proces tavení probíhá v platinovém kelímku. Aby se při ohřevu nedostaly do materiálu nečistoty, využívá se vysokofrekvenčního indukčního ohřevu kolem 5MHz. Dále se tavenina zbavuje OH iontů probubláváním vysoušecího plynu. Ten také slouží jako ohříváč taveniny, neboť bývá před použitím předeprát na tavnou teplotu. Finálním krokem je odlití skloviny do preforem. Ty si můžeme představit jako skleněné tyče, ze kterých se následně táhne vlákno. Velikost preformy ovlivňuje to, jak dlouhé vlákno z ní bude možné vytáhnout. Z velkých preform se dá vytáhnout vlákno až o délce několik set km.



Obrázek 3.1: Schéma tavné technologie

Druhou možnou technologií je technologie depozice par. Při ní se používá principu destilace, kdy ovšem nedestilujeme vodu, ale za vysoké teploty destilujeme sklo. To se odpaří a superčisté

skelné páry jsou zachytávány na „kondenzační destičce“. Touto technologií se dosahuje nejlepších výsledků, co do čistoty skloviny, ale kvůli nutnosti vysoké teploty je i energeticky nejnáročnější.[2]

3.2 Tažení vláken

Jedná se o ne příliš složitou technologii z pohledu teorie. V praxi je však tažení vlákna nesmírně náročný proces, využívající pro sebe několik pater budovy a zemskou gravitaci. Technologie je to levná, ale nelze s ní dosáhnout minimálních útlumů, protože nemá řízené rozhraní mezi jádrem a pláštěm. Touto technologií se dají vyrábět pouze Si vlákna velkých rozměrů. Roztavené sklo si uchovává stále svou poměrně vysokou viskozitu, takže není složité jeho tažení. Složité je řídit toto tažení tak, aby mělo vlákno po celé délce konstantní parametry, zejména tloušťku. V horní části stroje je mechanismus pro zavěšení skleněné preformy, který ji dokáže posouvat směrem dolů. Začátek preformy se nahřívá v peci pomocí kyslíko-vodíkových hořáků na teplotu těsně pod 2000°C, protože při této teplotě má vlákno nejlepší viskozitu pro tažení. Nejprve se začátek preformy nahřeje tak, aby vznikla kapka, která bude svou tíhou táhnout vlákno směrem dolů. Vlákno je pak taženo z preformy, za využití zemské gravitace k tahu. Protože je potřeba, aby vychladlo bez jakéhokoliv ohybu, musí být stolice pro jeho tažení poměrně vysoká. Obvykle prochází několika patry výrobních prostor. Další součástí stroje, kterou vytažené vlákno prochází je laserový optický měřič, který kontroluje jeho průměr. Pokud přístroj naměří větší průměr, tažení se mírně zrychlí, pokud naopak menší, tažení se zpomalí. Současně se také přesně reguluje teplota v peci. Tažící věž dále obsahuje nanášecí mechanismus ochranného laku, který je voděodolný. Tento lak je po cestě vytvrzován pomocí UV záření z výbojek umístěných dále v tažící věži. Někdy se postupně nanáší a vytvrzuje několik takových vrstev. Nakonec vlákno prochází důmyslnou soustavou kladek, které ho pevně ale citlivě drží a působí silou potřebnou na jeho tažení. V této části stroje se také mění směr tažení vlákna ze svislého na vodorovný a vlákno dále pokračuje k soustavě kladek, které ho navádějí na cívku, kde je ukládáno. Na cívku se vlákno začne namotávat teprve až po dosažení přesných hodnot parametrů, obvykle několik desítek metrů po zahájení procesu. Schéma takovéto výroby vlákna je na obrázku 3.2.

Další používanou metodou pro tažení vlákna je metoda Dvou kelímků. Výhodou této metody je možnost vyrábění vláken se skokovou změnou indexu lomu.

Jádrový a plášťový materiál je zvlášť umístěn do dvou kelímků. Geometrické rozměry vlákna závisí na rychlosti tažení a na teplotě těsně za hrotem obou kelímků. Z tohoto důvodu je do tohoto místa zaostřen CO laser, který velmi rychle reaguje na změny teploty nebo na změny v rychlosti tažení.[18][19]



Obrázek 3.2: Schéma tažení vlákna

3.3 Výroba Polymerů

Pro výrobu polymerů je stanoveno několik základních způsobů. Chemicky nejméně náročná je polymerace samotného monomeru. Pokud je polymer v monomeru rozpustný, vzniká při polymerizaci stále více viskózní roztok, který nakonec ztuhne na blok nádoby (bloková polymerace). Nerozpouští-li se vznikající polymer ve výchozím monomeru, vylučuje se v jemných částicích. Dále také může polymer vznikat přidáním vhodného rozpouštědla (roztoková polymerace). Častější než polymerace samotného monomeru v bloku nebo jeho roztoku se pro technologické výhody provádí emulzní polymerace suspenzní polymerace.[20]

3.3.1 Bloková polymerace

Blokovou polymerací se provádí iontová a radikálová polymerace. Výhodou tohoto postupu je, že lze připravit polymer o vysoké čistotě (např. vhodné pro elektroniku). Naopak technologickou nevýhodou polymerace v bloku je složitý odvod tepla. Při polymerizaci vždy dochází ke zmenšování objemu. Pro snadnější chlazení a potlačení zmenšování objemu (smršťování) se v bloku polymerují výrobky rozměru desky (jeden rozměr je tenký).

3.3.2 Roztoková polymerace

Výhodou oproti blokové polymerizaci je snadnější odvod tepla. Dále má oproti blokové polymerizaci vždy nižší molekulovou hmotnost M , což je způsobeno tím, že rozpouštědlo je zároveň přenašečem. Jestliže je polymer v rozpouštědle rozpustný, připraví se produkt, který se používá přímo, např. jako lepidlo nebo s přidavkem dalších aditiv jako nátěrová hmota.

3.3.3 Suspenzní polymerace

Také suspenzní polymerace netrpí na špatný odvod reakčního tepla. Princip je takový, že je nejdříve monomer s iniciátorem rozptýlen ve vodě pomocí míchání. S postupující konverzí reakce stoupá viskozita a lepkavost částic, což znásobuje nebezpečí jejich slepení ve velké shluky. Proto je nutné přidání látek, které snižují viskozitu nebo ulpívají na povrchu částic, aby se tomuto slepování zabránilo. Suspenzní polymer je kvalitativně stejnoměrnější než blokový, ale obsahuje více příměsí. Tímto způsobem se vyrábí např. PS a PVC.

3.3.4 Emulzní polymerace

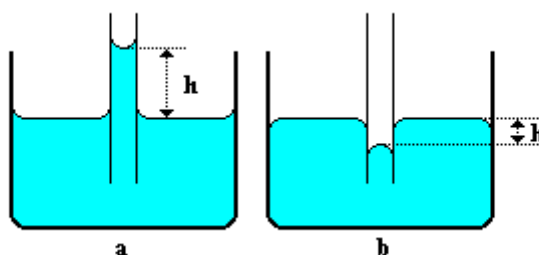
U tohoto procesu vzniká polymer také z částic, které jsou mechanicky rozptýleny ve vodě, která obsahuje emulgátor a iniciátor stejně, jako u předchozího příkladu. Od suspenzní polymerace se liší tím, že každá částice monomeru je chráněná obalem emulgátoru a při polymeraci se mění na „jedinou“ makromolekulu polymeru. Tím je zaručena možnost jejího růstu do vysoké molekulové hmotnosti. Stejně jako u suspenzní polymerace je u emulzní zaručen velmi dobrý odvod tepla, ale produkt je znečištěn aditivami.[21]

4 Kapilární jevy

Jelikož ve své praktické části budu tyto jevy často zmiňovat, převážně při první a druhé metodě tvorby vlnovodných optických struktur, je namístě vysvětlit, co je tímto pojmem myšleno. Kapilarita se nejvíce projevuje právě u kapalin, kde je vzdálenost mezi jednotlivými částicemi (molekulami) mnohem menší než například u plynů a tedy jejich vzájemné silové působení mnohem větší. Molekuly kapalin na sebe působí přitažlivými silami, uspořádání částic je krátko dosahové a snadno mění svůj tvar kvůli malé soudržnosti vrstev. Kapaliny jsou téměř nestlačitelné, ale mají stálý (vlastní) objem. Zvýšení teploty se projevuje zlepšením tekutosti.

Pokud ponoříme tenkou trubici o malém vnitřním průměru svisle do jiné nádoby naplněné kapalinou, lze v tenké trubici pozorovat zakřivení povrchu hladiny kapaliny a její vzestup, případně snížení vzhledem k hladině kapaliny ve větší nádobě. Oba tyto jevy se nazývají souhrnně kapilarita (kapilární jevy):[22]

- kapilární elevace – v tenké trubici se na hladině kapaliny vytvoří dutý vrchlík o poloměru R , který je výše než hladina okolní kapaliny. V tomto případě kapalina smáčí stěny trubice. Viz obrázek 4.1a.
- kapilární deprese – v tenké trubici se na hladině vytvoří vypuklý vrchlík, který je níže než okolní hladina. V tomto případě kapalina nesmáčí stěny trubice. Viz obrázek 4.1b.



Obrázek 4.1: Kapilární jevy

Pro poloměr vzniklého vrchlíku platí vzorec:

$$r = R \cos \theta \quad (4.1)$$

Takovéto zakřivení povrchu kapaliny u stěn nádoby způsobuje vznik přídavného tlaku. Tento tlak se nazývá kapilární tlak a je označován p_k . Pro kapilární tlak platí, že pod vypuklým povrchem je tlak větší právě o kapilární tlak oproti tlaku uvnitř kapaliny. Pod dutým povrchem je pak tento tlak menší. Má-li uvažovaný povrch tvar kulového vrchlíku (koule), pak vztah pro kapilární tlak je:

$$p_k = \frac{2\sigma}{R} \quad (4.2)$$

kde σ je povrchové napětí a R je poloměr kulového povrchu. Pokud známe poloměr vzniklého vrchlíku, můžeme snadno dopočítat kapilární tlak v kapalině pomocí vzorce:

$$p_k = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (4.3)$$

Kapilarita má značný význam v praxi. Kupříkladu vzlínavost vody, kdy voda vystupuje z hloubky tenkými kapilárami do povrchových vrstev půdy, kterou tak zavlažuje. Nasávání kapalin do knotů nebo vzlínavost roztavené pájky v tenkých spárách pro vytvoření dokonalých spojů pájených součástí.[23]

5 Vytvoření optických struktur z PDMS

V této kapitole se zabývám praktickou realizací výroby optických struktur a vlnovodů z Polydimethylsiloxanu. Při své práci jsem používal Silicon Elastomer 184 od firmy Dow Corning. Protože samotný Silicon je velmi viskózní a svým skupenstvím a bezbarvostí připomíná spíše bezbarvá maziva, je nutné jej vytvrdit. Bez tohoto vytvrzení se jedná spíše o kapalinu, jejíž optické vlastnosti jsou tristní. Až po skončení procesu vytvrzování je Polydimethylsiloxan schopen vést uspokojivě světlo. Zde platí přímá úměra mezi časem vytvrzování a schopností vést světlo, tedy čím více vytvrzen Polydimethylsiloxan bude, tím lépe se v něm bude světelný tok šířit. Pro vytvrzování jsem tedy použil tvrdící činidlo od stejnojmenné firmy, které se dodává společně se Siliconem. Pro optimální vytvrzovací účinky je doporučováno dle datasheetu výrobku míchat výslednou sloučeninu v poměru 10:1, kdy na deset dílků Silicon Elastomeru připadne jeden dílek tvrdnoucího činidla. S tímto poměrem se však dá manipulovat na obě strany poměru a ovlivňovat tak dobu, po kterou zůstane Polydimethylsiloxan v tekutém skupenství. Převáděno do praxe, pokud namíchám kupříkladu poměr 10:2, bude výsledné skupenství tvrdnout déle, naopak při poměru 10:0,5 bude tvrdnutí urychleno. Nelze však prokázat konkrétní časové hodnoty, neboť samotné vytvrzování je ovlivněno jak teplotou v místnosti, tak její vlhkostí či množstvím UV záření dopadajícího do místnosti ve kterém Polydimethylsiloxan tvrdne.

Ve své práci jsem prakticky zkoumal hned několik způsobů tvorby optických struktur a vlnovodů. Všechny způsoby a jejich výsledky jsem popsal v práci níže společně s motivací pro jejich užití a následným vyhodnocením zdali je vhodné takto optické struktury vyrábět, či nikoli.

5.1 Příprava směsi

Každému pokusu však předcházela příprava směsi. Jednotlivé složky (Silicon Elastomer a vytvrzovací činidlo) jsem nabíral rovnou do injekční stříkačky z příslušných nádob. U přípravy směsi bylo důležité dbát na to, aby se do zásobníku žádná složka nedostala složka druhá z důvodu případného znehodnocení celého zakoupeného kitu. Proto jsem pro přípravu používal vždy nové injekční stříkačky. Nejprve jsem nabíral Silicon Elastomer 184, následně jsem přidával vytvrzovací činidlo a to v doporučeném poměru 10:1. Vzhledem k rozdílným hustotám kapalin bylo třeba výslednou směs manuálně promíchat, aby se vytvrzovací činidlo rozptýlilo v celém Silicon Elastomeru, nikoli jen po jeho horní části kam se nalilo. Tento proces pak byl umocněn použitím třepačky směsí typu IKA VORTEX Genius 3, ve které jsem nechal směs třepat pokaždé alespoň 40 minut. Výsledkem bylo dokonale rozptýlené vytvrzovací činidlo a také minimum vzniklých vzduchových bublinek, které by pak narušovaly lom světla ve finálním výrobku. V případech, kdy nepomohla ani třepačka jsem umístil injekční stříkačku s výslednou tekutou směsí do lednice, jejíž teplota umocnila rychlost a úspěšnost vymizení vzduchových kapslí uvnitř injekční stříkačky. V lednici bylo třeba ponechat směs alespoň po dobu jedné hodiny.

Teprve takto vytvořená a promíchaná směs byla vhodná pro tvorbu optických struktur a vlnovodných ploch.

5.2 Tvorba optických vlnovodů pomocí injekční stříkačky

Po nastudování potřebné literatury a prvotním seznámením se s Polydimethylsiloxanem jsem usoudil, že pro vytvoření vlnovodné cesty bude nejsnazší využít injekční stříkačky a k ní uchycené injekční jehly. Cílem bylo vytvořit takovou strukturu, která by co nejvíce napodobovala běžné optické vlákno, co do tloušťky. Z toho důvodu byla nejdříve použita jehla o vnitřním průměru 0,15 mm. Ta se vzhledem k velkým kapilárním jevům uvnitř, ukázala jako krajně nevyhovující a byla nahrazena kanylou o průměru 2,2 mm. Kanylu bylo následně nutno upravit tak, aby disponovala rovným koncem, nikoli špičkou. Zde byl kladen důraz na to, aby bylo ústí co nejrovnější. Následně bylo nutné vymyslet způsob zahřívání směsi a dosažení tak potřebné teploty k vytvrzení Siloxanu. První uvažovanou možností bylo nanášet Siloxan na rozžhavenou plochu. K tomu účelu jsem použil rozežhřátý plech na 250°C z trouby. Výsledek byl však neuspokojivý. Siloxan nevytvrdl okamžitě dle očekávání, ale rozlil se po povrchu a tuhnul v rozmezí 20-30 minut.

Dalším pokusem bylo zahřívání Siloxanu již uvnitř jehly takovým způsobem aby z ústí jehly vycházelo vlákno minimálně předvytvrzené do takové míry, aby drželo tvar a mohlo se následně dopéci v troubě. V nejideálnějším případě mělo být vlákno ve finální podobě a tvrdosti vytlačováno přímo z jehly. K tomu bylo zapotřebí vymyslet vhodný zdroj tepla a také jeho umístění na jehle. K tomuto účelu jsem využil tavné pistole od firmy Lobster, která slibovala 10W výkon a maximální tavnou teplotu 190°C. Tu jsem rozložil, zbavil ochranných plastů a využil pouze kovovou dutinku a topné tělísko. Tato kovová dutinka byla instalována přímo na kanylu tak, že ji zakryla téměř po celé délce. Výsledný výrobek je možno vidět na obrázku 5.1. Takto nachystaný systém jsem zapojil do zásuvky, vyčkal 8 minut, než se topné tělísko nažhavilo na svou maximální teplotu a pokusnou metodou jsem odhadoval nutnou sílu tlaku na píst injekční stříkačky abych Siloxan tlačil takovou rychlostí, která by stačila k jeho vytvrzení.



Obrázek 5.1: *Kapilára s topným tělískem*

To se vyjevilo jako nesplnitelná podmínka. Při příliš velkém tlaku na píst, kapalina vytékala příliš rychle z ústí jehly a nestačila tak vůbec vytvrdnout. Naopak při příliš slabém tlaku kapalina jehlou protékala příliš pomalu a vytvrdla do finální podoby již v jehle. Jelikož toto vytvrzování s sebou nese vedlejší proces a to jemné přilnutí Polydimethylsiloxanu k danému povrchu, bylo v tu chvíli nemožné výsledné vlákno vytlačit ven, aniž by došlo k jeho mechanickému poškození. Již samotné tlačení vlákna skrze kanylu bylo dosti fyzicky náročné a ve chvíli, kdy vlákno uvnitř jehly vytvrdlo, začal při nadměrném tlaku prolézat Siloxan kolem pístu v injekční stříkačce, nikoli však skrze kanylu. Do této metody jsem původně vkládal největší naděje na úspěch, avšak kvůli přílišným kapilárním jevům uvnitř kanyly jsem tuto metodu zavrhl jako nevyhovující.

5.3 Tvorba optických vlnovodů pomocí gumové bužírky

Jelikož nebylo možné vytvářet vlnovodné válcovité struktury přímým zahříváním jehly, dalším pokusem bylo vytvoření válcovité formy, do které by se Siloxan nalil a nechal vytvrdnout. Protože jsem si kladl vysoké nároky na hladkou povrchovou strukturu, bylo velmi obtížné vyrobit z domácích zdrojů takovouto přesnou formu, uchýlil jsem se k využití brček, které lze pořídit spolu s nápoji. Ty však s sebou nesly několik omezení – nebyl zaručen jejich konstantní průměr, měly povětšinou seřiznuté konce, byl jsem limitován velmi malou délkou a celková výroba nebyla dostatečně precizní, aby výsledná vlákna byla stále stejné struktury. Nicméně pro ověření funkčnosti této metody byly brčka dostačující.

Po přípravě směsi stejným způsobem jak již bylo popsáno výše, jsem pomocí injekční stříkačky naplnil na jednom konci utěsněné brčko rozmíchanou směsí. Jako těsnění jsem použil korek vytvarovaný do tvaru ústí brčka. Stejným způsobem jsem po naplnění utěsnil i druhý konec a takto zhotovenou a naplněnou formu jsem dal vypéci do trouby na 50°C po dobu hodiny a půl. Takto nízkou teplotu a dlouhý čas vypékání jsem zvolil z důvodu, aby se plast, ze kterého je brčko zhotovené nespeklo se Siloxanem dohromady. Při tomto postupu došlo k následnému znehodnocení gumového obalu, neboť gumový obal bylo nutné minimálně v jeho ústí naříznout, ne-li rozříznout brčko po celé jeho délce, což vzhledem k jeho tloušťce stěny cca 1mm bylo těžce proveditelné. Další nevýhodou byla neprůhlednost brčka a tak nebylo možné zjistit, zdali je, nebo není struktura vlákna narušena vzduchovými bublinami, viz obrázek.



Obrázek 5.2: *Struktura narušená vzduchovými bublinami*

Na obrázku 5.2 je vidět právě vlnovod získaný z brčka a jeho nutný stupeň destrukce. Zbytek vlákna byl vytažen pouze tahem směrem ven. Vyrobené Polydimethylsiloxanové vlákno je velmi pružné a ohebné, čehož bylo využito právě při vytahování z této improvizované plastové formy. Již zmíněnou nevýhodou této metody byla nemožnost kontrolovat strukturu vlákna jak před, tak i při vytvrzování. Na obrázku 5.2 je vidět narušení struktury vzduchovými bublinami, které vznikají dvěma způsoby:

- Již při plnění, kdy není vyvinut soustavný tlak na píst injekční stříkačky nebo pokud je ústí injekční stříkačky mnohem menší než forma, do které je Siloxan plněn.
- Při vytvrzování, při rychlém zahřívání na vysokou teplotu. Z tohoto důvodu jsem všechny ostatní pokusy prováděl tak, že jsem Siloxan zahříval minimálně 2 hod na teplotu do 40°C a poté až dopékal při vysokých teplotách, dokud vlákno dostatečně neztvrdlo. Při těchto pokusech jsem také došel k závěru, že čím déle se vlákno vytvrzuje, tím lepší vlastnosti pro vedení světla poté získá.

Jak je vidno, plastová brčka sloužily pouze k seznámení se s takovýmto způsobem získávání optických struktur z Polydimethylsiloxanu a k vytvoření nutných podmínek k úspěšnému vytvoření vlákna o uspokojivé délce pomocí této metody. Tyto podmínky jsem shrnul do 3 bodů:

- Forma musí být průhledná.
- Její vnitřní průměr musí být shodný s průměrem injekční stříkačky sloužící k plnění.
- Stěna musí být dostatečně tlustá, aby ji bylo možné pouze naříznout a nepoškodit vzniklé vlákno uvnitř.

Takovýmto požadavkům nejvíce vyhovovala gumová bužírka. Postupně jsem zavrhl hadičky pro brzdovou kapalinu nebo hadičky do ostříkovačů. Jako nejvhodnější kandidáti zůstaly bužírky z akvaristických potřeb a hadičky do infuzí. Obě byly dostatečně hrubé, tenké a měkké, tedy vhodné k následnému nařezávání. Infuzní hadička je vyobrazena na obrázku 5.3.



Obrázek 5.3: *Infuzní hadička*

5.3.1 Samotná výroba vlnovodu

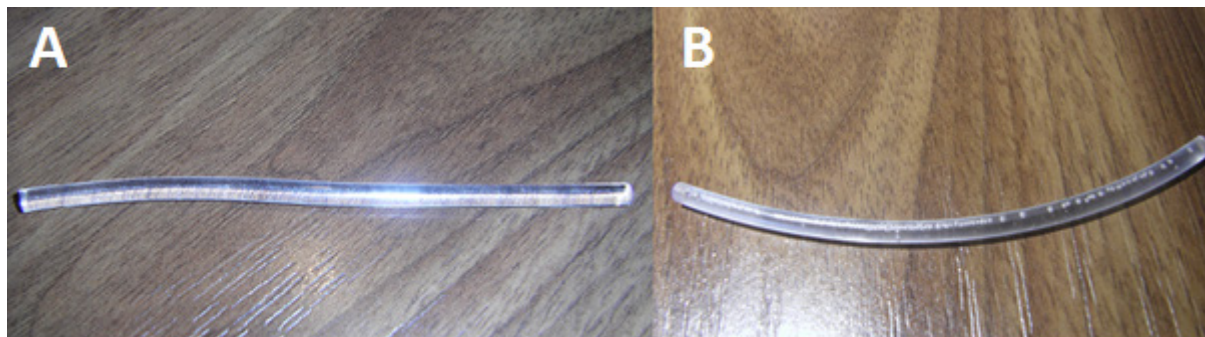
Konkrétní vzorek použit při výrobě optického vlnovodu měl délku 3m. Na jednu stranu hadičky byla připevněna injekční stříkačka a druhý konec zůstal neutěsněn, aby nevznikaly vzduchové bubliny při plnění a aby bylo snazší hadičku naplnit celou. I zde se projeví kapilární jevy a bylo třeba vyvinout velký tlak k naplnění. Poté se oba konce utěsnily opět pomocí korku a vlákno se nechalo tuhnout při pokojové teplotě. V datasheetech je uváděna doba takového tuhnutí 48 hodin. Protože jsem však oba konce hadičky utěsnil, aby naplněný Siloxan nevytekl, nemohlo dojít k reakci Siloxanu se vzduchem a celkový proces vytvrzování se prodloužil na několiknásobek předpokládané doby. Tvrdnutí při pokojové teplotě bylo vlákno ponecháno 5 dní v nataženém stavu, aby nevytvrdlo již zahnuté a mohlo se tedy po vyjmutí libovolně namáhat a ohýbat. Po této době bylo již natolik vytvrzené, aby při jeho prudkém zahřátí nevznikly vzduchové bubliny. Aby byla jakost vlákna co nejlepší, umístil jsem vlákno do trouby a nechal vypékat další 2 hodiny na 40°C. Teprve poté jsem bužírku nařízl a vytvrzené vlákno vyjmul. Výsledek lze vidět na obrázku.



Obrázek 5.4: *Vytvořené vlákno*

Tímto pokusem jsem si ověřil, že tato metoda je jednoduše opakovatelná, a lze takto vytvořit vlákno prakticky libovolné délky. Tento konkrétní vzorek měří 3m. Při dalších pokusech jsem se již omezil na výrobu kratších vláken, ze kterých jsem vytvářel deseti centimetrové vzorky a ty následně

podrobil měření. V rámci snížení časové náročnosti jsem naplněné bužírky zahříval na 75°C, neboť guma při 40°C nejevila sebemenší známky destrukce. V kuchyňské troubě byly vytvrzovány při 75°C po dobu 2 hod. Na obrázku 5.5 jsou vidět takto získané kratší vzorky, kdy na obrázku *a* je vzorek kvalitní a na obrázku *b* je vzorek se vzduchovými bublinami, tudíž nevhodný.



Obrázek 5.5: *Kvalitní a nekvalitní vytvrzený vzorek*

5.4 Gravitační metoda

Poslední zkoumanou metodou pro výrobu optických vlnovodů byla metoda, kdy jsem nechal vlákno vytahovat se svou vlastní vahou. Inspiraci pro tuto metodu jsem čerpal ze zavedeného způsobu tažení křemíkových optických vláken, který vysvětluji ve své teoretické části. Zkonstruoval jsem tak doma improvizovanou tažící věž optických vláken v domácích podmínkách. Cílem bylo vytvořit věž, která by byla dostatečně vyhrátá, aby v ní vlákno tvrdlo dostatečně rychle a stihlo tak vytvrdnout již při svém vytahování se. Jako zásobník Siloxanu jsem opět použil injekční stříkačku, jejíž ústí mělo vnitřní průměr 2mm. Jako zdroj tepla jsem použil rozehřátý krb s mramorovou deskou, na kterou jsem umístil válec z plechu o tloušťce 1,5mm a průměru 9centimetrů a nechal jej nažhavit. Aby bylo možné kontrolovat délku vytaženého vlákna, vyřezal jsem otvor do spodní části válce, který však musel být při počátku vytahování vlákna zadělán, protože smíchávání teplého a studeného vzduchu v otvoru způsobovalo vychylování vlákna na stěny trubky, což bylo nežádoucí. Pro uchycení injekční stříkačky jsem použil uřezané pet lahve na jejíž ústí jsem injekční stříkačku zaaretoval. Takto zhotovenou improvizovanou tažící věž lze vidět na obrázku 5.6.



Obrázek 5.6: *Improvizovaná domácí tažící věž*

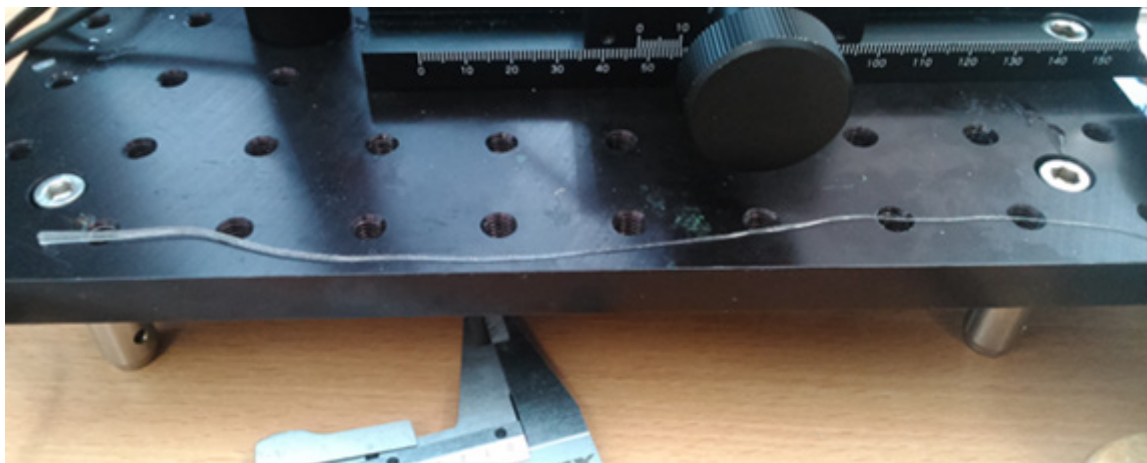
V tuto chvíli bylo možné pokusit se o vytažení vlákna. První pokus byl však neúspěšný, protože namíchaný siloxan byl příliš kapalný a nestihl vytvrdnout dříve, než vlákno steklo na dno „věže“. Bylo tedy ještě před samotným tažením nutné Siloxan připravit do stavu, kdy ještě nebyl natolik tuhý, aby šel protlačit ústím injekční stříkačky, ale zároveň nebyl natolik kapalný, aby stekl na dno, aniž by byl dostatečně vytvrzen. Z toho důvodu jsem dal naplněnou injekční stříkačku a utěsněnou z obou stran předvytvdnout do kuchyňské trouby. V tabulce 5.1 jsou sepsány vybrané informativní časy a teploty předvytvrzování směsi, než došlo k samotnému tažení.

Tabulka 5.1: Časy potřebné k předvytvrzení směsi

pokus číslo	doba před vytvrzování	teplota	poznámka
1	14min.	50°C	čerstvě namíchaná směs
2	10min.	50°C	3 dny v lednici
3	20min.	50°C	vytaženo z lednice
4	8min.	50°C	siloxan již byl v pokojové teplotě
5	20min.	50°C	čerstvě namíchaná směs
6	30min	40°C	vytažen z lednice
7	15min.	40°C	po 2 hod na vzduchu
8	25min.	40°C	po hodině a půl na vzduchu

Jak je z tabulky 5.1 patrné, časy se diametrálně lišily. To přisuzuji nikoli těkavosti směsi, ale nemožnosti zopakovat přesné podmínky před vytvrzování neboť příprava směsi musela probíhat ve školních laboratořích, ale samotné tažení jsem prováděl doma. Stejně tak příkládám význam pokojové teplotě, vlhkosti vzduchu a dalším faktorům s nimi spojených. Musel jsem si tedy určit jinou metodu pro odhad správného před vytvrzení. K tomu mi posloužila vzduchová bublina, kterou jsem vtáhl do injekční stříkačky. Jelikož se při vytvrzování Siloxanu mění jeho hustota, dá se očekávat, že i vzduchová bublina bude uvnitř injekční stříkačky putovat jinou rychlostí v čerstvém Siloxanu a jinou rychlostí v lehce vytvrzeném. Pozorováním jsem zjistil, že PDMS netuhne symetricky v čase, avšak rychlost tuhnutí se s časem exponenciálně zvyšuje. Prvních 10 minut tuhnutí nebyly pozorovány žádné změny avšak v následujících 10-15 minutách se mi nezdálo, že vzorek vytuhl natolik, že se nedal pístem v injekční stříkačce stlačit. Ve výsledku stačilo kontrolovat vzorek co 5 minut a v rozmezí 15-20min byl vzorek připraven na tažení.

Samotné tažení bylo nutné provádět co nejrychleji, jelikož při odstranění zátěže z ústí injekční stříkačky začne Polydimethylsiloxan reagovat se vzduchem zvýšenou rychlostí tuhnutí a vlákno tak lze tlačit po dobu maximálně jedné minuty, pak jsou již kapilární jevy natolik silné, že další tlačení skrze injekční stříkačku je již značně obtížné a vlákno nevytváří vláknovou strukturu, ale hromadí se u ústí a celkově se deformuje. Na obrázcích 5.7 a 5.8 jsou vidět ukázky vláken vytažených touto metodou.



Obrázek 5.7: *Získaný vzorek*



Obrázek 5.8: *Získaný vzorek*

Tato metoda je tedy ve výsledku také použitelná pro výrobu optických vlnovodů, nicméně je velmi komplikovaná na postup, kdy je třeba nechat směs vytuhnout do stavu, kdy bude stékat vytvořenou věží dostatečně pomalu. Další limitace je v délce věže, jelikož má takto vytvořené vlákno tendenci snižovat svou tloušťku ke konci, je zde velké procento vytaženého vlákna nepoužitelné. Z toho důvodu by bylo nejvhodnější použít věž co nejvyšší, čímž by se také prodloužila dráha, po kterou je vlákno vytvrzováno. Při porovnání s metodou bužírkovou, je tato nepoměrně složitější na techniku výroby, a tudíž se přikláním k výše zmíněné alternativě.

5.5 Tvorba vlnovodných ploch z PDMS

Abych ověřil vliv stárnutí PDMS směsi a také vliv teploty okolního prostředí na směs, vytvořil jsem značné množství vlnovodných ploch. K jejich tvorbě jsem použil dvou Petriho misek o průměrech 38mm a 32mm. Postup výroby byl prakticky totožný, použil jsem rozmíchanou směs, kterou jsem plnil po 1,5ml a 2ml do obou misek. Cílem bylo vytvořit vlnovodné struktury z PDMS, u kterých bych ověřil závislost útlumu na stárnutí namíchané směsi a také způsobu, jakým je uchovávána. Vytvořil jsem proto 14 vzorků, kdy jsem nechal Polydimethylsiloxan postupně tuhnout na vzduchu a následně jsem jej vypékal v kuchyňské troubě na teplotu 80°C po dobu 30min. Takto jsem vytvářel vzorky co hodinu. V druhé části této výroby jsem namíchaný vzorek PDMS uskladnil v lednici při teplotě 6°C. Vzhledem k razantnímu zpomalení tvrzení PDMS v lednici jsem byl ve sbírání vzorku benevolentnější a sesbíral jsem celkem 9 vzorků v průběhu 3 dnů, než došlo k přílišnému ztuhnutí směsi uvnitř injekční stříkačky, kterou jsem směs do Petriho misek dávkoval.

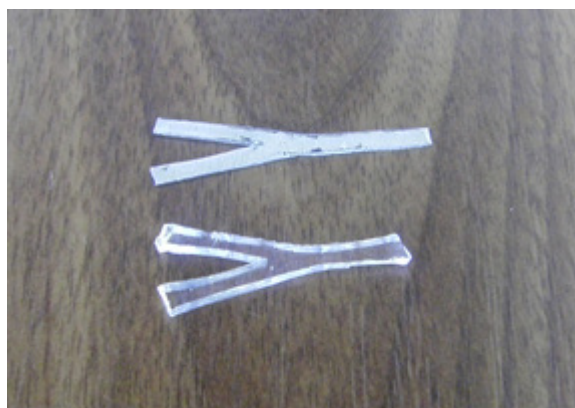
Aby byla vzniklá vlnovodná plocha co nejkvalitnější, bylo nutné ji zbavit vzduchových bublin, které vznikly při dávkování, a také musela tvrdnout na vodorovné ploše, aby byla rovnoměrná. Na obrázku 5.9 je vidět výsledný vytvrzený vzorek z jedné hodiny.



Obrázek 5.9: Vytvrzený vzorek po 12 hodinách na vzduchu

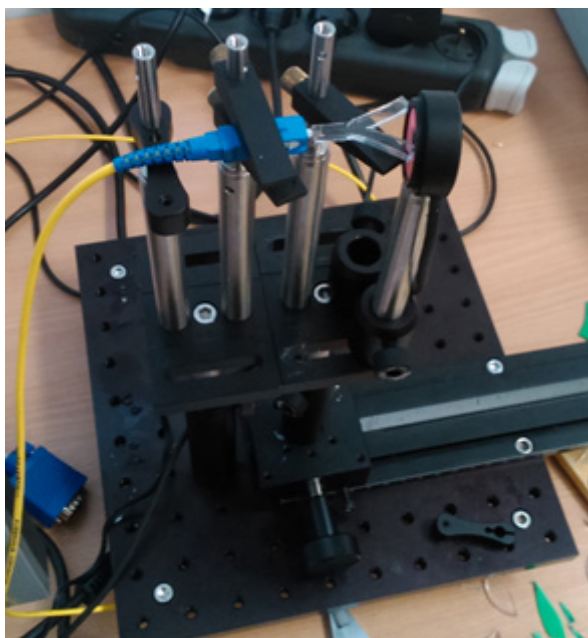
5.6 Tvorba optického Splitteru

V závěru jsem se pokusil vytvořit optický splitter, který by dělil přenášený světelný paprsek v poměru 50:50. Splitter jsem vyřezával ze získaných vlnovodných ploch v předchozím pokusu. U jeho tvorby jsem se inspiroval již zavedenými optickými splittery a snažil jsem se tedy dodržet, aby úhel, jež svírají obě ramena, nepřesáhl 20° . Z toho důvodu jsem si nejprve narýsoval předlohu na tvrdý papír, kterou jsem následně vystříhl. Nejprve jsem se pokusil vyřezat z PDMS splitter právě jen pomocí této papírové formy, kterou jsem pouze přiložil na vytvrzenou PDMS plochu a pokusil se břitvou splitter vyřezat. Vzhledem k malým rozměrům a měkkosti papíru byl výsledek neuspokojivý. Dalším krokem tedy bylo přerýsovat formu na měkký plast o tloušťce 1mm. Pomocí této plastové formy jsem se opět pokusil vyřezat další vzorky. Nicméně i takto získané vzorky byly nepřesné. V posledním pokusu jsem vytvořil předlohu z 0,5mm plechu, avšak i takto vytvořený mustr nepomohl ke získání několika stejných siloxanových splitterů. Plechovou šablonu a z ní vyřezaný optický splitter lze vidět na obrázku 5.10.



Obrázek 5.10: Vytvořený optický Splitter

Uchýlil jsem se tedy zpět k plastové formě pro její snadnější manipulaci a vyřezal jeden exemplární vzorek pro experimentální měření. Použitý výrobní postup však není vhodný na rozsáhlejší výrobu, jelikož nelze zajistit jeho opakovatelnost. Samotné měření a použitý vyřezaný splitter lze vidět na obrázku 5.11. Úbytek výkonu byl markantní, avšak z měření je patrné, že při vhodném výrobním postupu je PDMS schopen dělit světelné paprsky v určeném poměru.



Obrázek 5.11: Měření optického Splitteru

Naměřené hodnoty jsou zapsány v tabulce 5.2.

Tabulka 5.2: Naměřené a dopočtené hodnoty pro optický Splitter

číslo vzorku	Detekovaný výkon v $[\mu\text{W}]$	útlum v $[\text{dB}]$ na 1cm délky	větev
1	6,86	1,64429	Levá
	96,4	0,76335	Pravá
2	51,70	0,97104	Levá
	22,62	1,24658	Pravá
3	92,1	0,77856	Levá
	90,1	0,78588	Pravá
4	78,8	0,83055	Levá
	92,3	0,77784	Pravá
P referenční	952 μW		

Útlumy naměřených hodnot jsou značné, nicméně při správném výrobním postupu, kdy by byly vytvořené vzorky dostatečně přesné, je velice pravděpodobné, že dělicí poměr bude opravdu 50:50. Z tabulky je patrné, že naměřené hodnoty mají velký rozptyl, který je zapříčiněn nepoměrem šířky větve splitteru a průměru ferule. Pro ideální dělicí poměr je třeba směřovat feruli ve středové ose splitteru. Jakékoliv vychýlení směrem k jedné větvi, tuto větev zvýhodní a výsledný dělicí poměr bude tímto ovlivněn.

6 Měřicí pracoviště

6.1 Konstrukční model THORLABS

Abych mohl úspěšně změřit propustnost optických prvků z PDMS, bylo nutné vytvořit měřicí pracoviště, kam bych mohl připevnit světelný zdroj, samotné optické prvky z PDMS a optický detektor. K tomuto účelu skvěle posloužil konstrukční model od americké firmy THORLABS, která se věnuje výrobě fotonických produktů, které rozesílá ze svého sídla v New Jersey do celého světa. Tato firma disponuje sortimentem o více než 200 000 různých fotonických produktech. Velkou výhodou této stavebnice je její preciznost, přesnost a také odolnost, neboť všechny komponenty jsou vyhotoveny ze slitin kovu a vyráběny na CNC strojích Haas.[24]

Pro své měření jsem využil jen malou část jejich sortimentu. V zásadě jsem potřeboval rovnou základnu, posuvné rameno s vyznačeným metrem, několik horizontálně posuvných tyčí a samotné aretační ramena pro uchycení optických struktur a zdroje záření a detektoru. Protože jsem měřil různé optické struktury, stavebnice se v průběhu měření měnila podle potřeb. Pro příklad uvádím na obrázku 6.1 jednu z verzí sestaveného měřicího pracoviště, konkrétně pro měření vláknových struktur.



Obrázek 6.1: Sestavené měřicí pracoviště

6.2 Měřicí přístroje

Pro měření úbytku výkonu ve vytvořených optických strukturách jsem použil jako zdroj EXFO FLS-2600B. Na tomto zdroji jsem nastavil vlnové délky 1550 nm a 1310nm na kterých jsem výkony proměřoval.

Pro detekci výkonu na výstupu jsem použil Germaniový optický výkonový sensor S122C. Od společnosti THORLABS. Ten jsem připojil k digitálnímu optickému power metru PM100D opět od firmy THORLABS. Logické schéma zapojení lze vidět na obrázku 6.2.

6.2.1 Technické parametry

EXFO laditelný laserový zdroj FLS-2600B

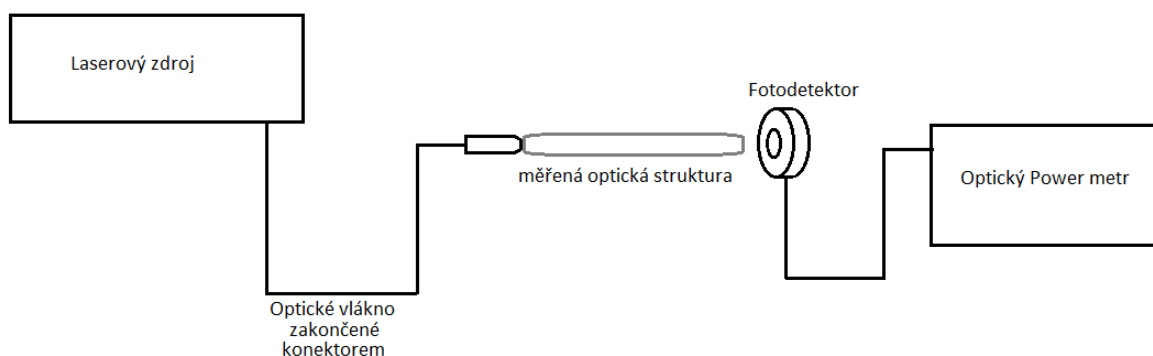
- Nejistota ± 15 pm
- Výkonová stabilita ± 0.005 dB
- S/SSE > 75 dB

Optický sensor THORLABS S122C

- Rozsah vlnových délek: 700 – 1800nm
- Výkonový rozsah: 50nW – 40mW
- Typ detektoru: Germaniová fotodioda
- Linearita: $\pm 0,5\%$
- Rozlišení: 2nW

Power meter THORLABS

- Výkonový rozsah: 100pW – 200W
- Rozsah vlnových délek: 185nm - 25 μ m
- Obnovovací frekvence displeje: 20 Hz
- Šířka pásma: 100kHz



Obrázek 6.2: Logické schéma zapojení

Protože měřím úbytek výkonu, který je zaznamenáván ve wattech, ale do tabulek a grafů vynáším hodnoty v dB, je třeba hodnoty přepočítat dle vzorce pro výkon:

$$P = P_0 \cdot e^{-\alpha \cdot d} [W] \quad (6.1)$$

Kde P_0 označuje vyzařovaný výkon ze zdroje, tedy výkon referenční, P označuje právě výkon naměřený a d označuje délku zkoumaného vlákna nebo tloušťku optické plochy. Z tohoto vzorce pak lze vyjádřit α pomocí jednoduchých matematických úprav:

$$\frac{P}{P_0} = e^{-\alpha \cdot d} \quad (6.2)$$

$$\ln \frac{P}{P_0} = -\alpha \cdot d \quad (6.3)$$

$$\frac{\ln \frac{P}{P_0}}{d} = -\alpha \quad (6.4)$$

$$\alpha = - \frac{\ln \frac{P}{P_0}}{d} [dB] \quad (6.5)$$

7 Praktické měření

7.1 Měření vzorků získaných bužírkovou metodou

V první fázi porovnávání vlastností siloxanových vlnovodů jsem použil 10 vzorků siloxanu starého 24 hodin a uchovaného v lednici viz Tabulka 7.1. Tyto vzorky byly vytvářeny v bužírkách dlouhých 22cm z důvodu možnosti zaříznutí konců po vytvrzení, jelikož siloxan při vytvrzování dokonale obalil korkové záslepky a k měření bylo třeba hladkých rovných konců, aby nedocházelo k nežádoucím odrazům světelných paprsků. Větší délka byla také zvolena z preventivních důvodů, pokud by došlo k výskytu vzduchových bublin při vytvrzování, nebo k nežádoucímu zakřivení vlákna při vytvrzování. Všechny vzorky jsem měřil na vlnové délce 1550nm.

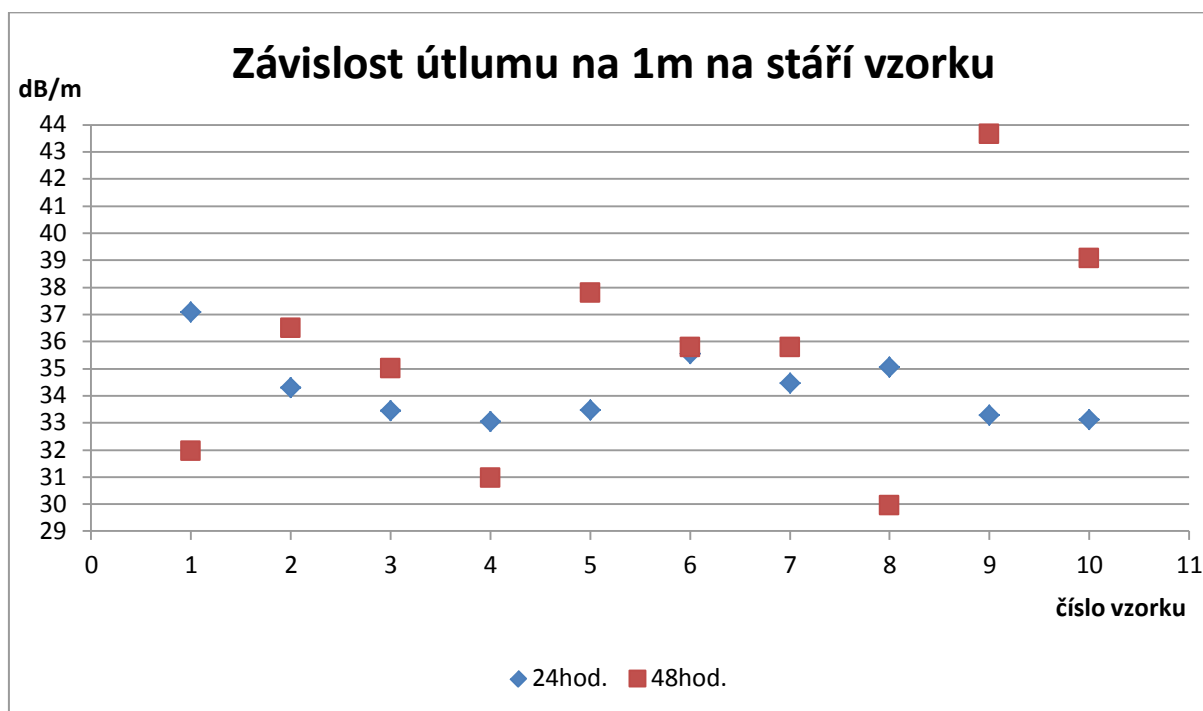
Tabulka 7.1: Naměřené a dopočtené hodnoty pro 24 hodin starý Siloxan

číslo vzorku	Detekovaný výkon v [μ W]	útlum v [dB] na 1mm délky	útlum v [dB] na 1m délky
1	12,53	0,03708	37,08
2	16,6	0,03427	34,27
3	18,06	0,03342	33,42
4	18,77	0,03304	33,04
5	18,01	0,03345	33,45
6	14,61	0,03554	35,54
7	16,3	0,03445	34,45
8	15,37	0,03504	35,04
9	18,35	0,03326	33,26
10	18,65	0,03310	33,10
P referenční	510,8		

Stejný postup jsem dodržel i pro vzorky Siloxanu starého 48 hodin a taktéž uchovávaného v lednici. Výsledky měření těchto vzorků jsem zařadil také dva vzorky, které byly ponechány ve vytvrzovacím procesu po kratší dobu, což vedlo k zvýšení úbytku světelného výkonu při průchodu. Taktéž jsou ve vzorcích obsaženy 2 vzorky, které byly vytvrzovány nejdéle. U těch pak byl naměřený výkon největší. Výstup z těchto dvou tabulek jsem zakreslil do grafu na obrázku 7.1

Tabulka 7.2: Naměřené a dopočtené hodnoty pro 48 hodin starý Siloxan

číslo vzorku	Detekovaný výkon v [μ W]	útlum v [dB] na 1mm délky	útlum v [dB] na 1m délky	Poznámka
1	20,94	0,03194	31,94	
2	13,3	0,03648	36,48	
3	15,43	0,03500	35,00	
4	23,15	0,03094	30,94	Nejlépe vytvrzen
5	11,68	0,03778	37,78	
6	14,3	0,03576	35,76	
7	14,29	0,03576	35,76	
8	25,6	0,02993	29,93	Nejlépe vytvrzen
9	6,5	0,04364	43,64	Špatně vytvrzen
10	10,28	0,03906	39,06	Špatně vytvrzen
P referenční	510,8			



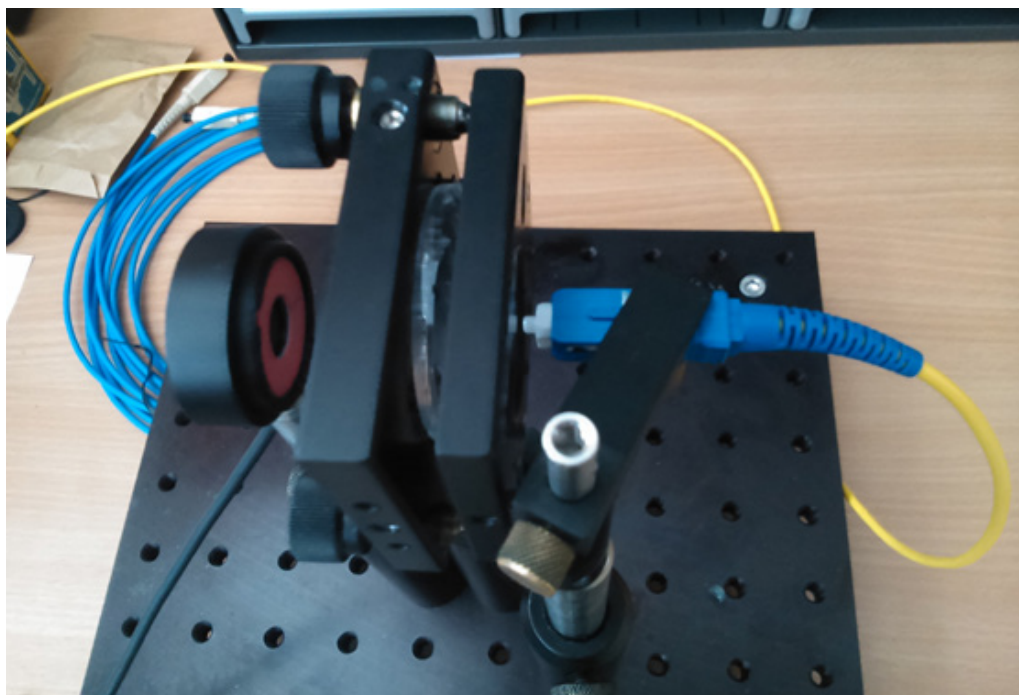
Obrázek 7.1: Závislost útlumu na 1m na stáří vzorku

Na grafu na obrázku 7.1 lze vidět porovnání 10 vzorků starých 24 hodin a 10 vzorků starých 48 hodin. Z těchto deseti vzorků jsou dva špatně vytvrzeny, což bylo poznat i na dotek, kdy špatně vytvrzené vzorky jsou ještě stále mírně viskózní, jinak řečeno lepivé. Kvůli tomu, že krystalická

mřížka není ještě dostatečně vytvrzena, vznikl ve vlnovodu velký úbytek výkonu a tudíž i narostl útlum. Z toho lze usoudit, že existuje závislost na době vytvrzování vzorku, avšak jak je z grafu patrné, stárí PDMS nemá zásadní vliv na kvalitu, pokud je uchováván v lednici, tedy za nízké teploty.

7.2 Měření optických vlnovodných struktur

Měření jsem podrobil také vytvořené optické vlnovodné struktury, kde jsem měl více vytvrzených vzorků napříč časem. Opět jsem zkoumal vliv stárnutí vzorku v lednici a na vzduchu. Pro měření získaných vzorků, jsem upravil konstrukční model THORLABS tak, aby bylo snazší přichytit vytvořenou vlnovodnou plochu. Výsledné měřicí pracoviště je vyobrazeno na obrázku 7.2. Měření jsem prováděl na vlnových délkách 1310nm a 1550nm.



Obrázek 7.2: *Sestavené pracoviště pro měření optických struktur*

Vzorky jsem sbíral každou hodinu od finální přípravy směsi již zbavené bublinek až po dobu, kdy již nebylo možné vytvořit rovnoměrnou vlnovodnou plochu. V tabulce 7.3 jsou vidět naměřené a dopočtené hodnoty PDMS stárnoucího na vzduchu.

Tabulka 7.3: Naměřené a dopočtené hodnoty PDMS stárnoucího na vzduchu

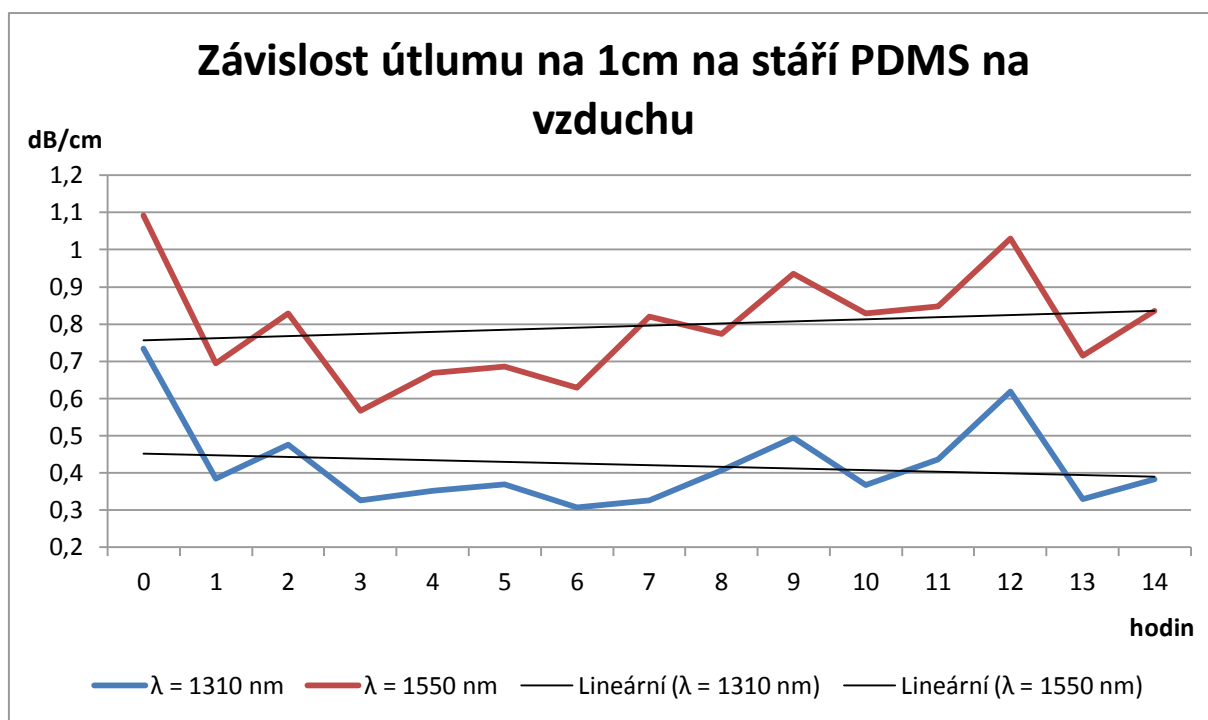
Hodina	Tloušťka vzorku [mm]	$\lambda = 1310 \text{ nm}$		$\lambda = 1550 \text{ nm}$	
		Detekovaný výkon [mW]	útlum [dB] na 1 mm délky	Detekovaný výkon [mW]	útlum [dB] na 1 mm délky
0	1,4	0,971	0,073342337	0,878	0,109177266
1	1,7	1,008	0,038401348	0,909	0,069499807
2	1,9	0,983	0,047577169	0,874	0,082849679
3	1,7	1,018	0,032594437	0,929	0,056697663
4	1,8	1,01	0,035166739	0,907	0,066862398
5	1,9	1,003	0,036976291	0,898	0,068591946
6	2	1,012	0,030660945	0,902	0,062940123
7	1,4	1,028	0,032596639	0,912	0,082039126
8	1,6	1,008	0,040801433	0,904	0,077290878
9	1,5	0,999	0,049500641	0,889	0,093598354
10	1,4	1,022	0,036777836	0,911	0,082822763
11	1,2	1,021	0,043723269	0,924	0,084818912
12	1,2	0,999	0,061875802	0,904	0,103054505
13	1,5	1,024	0,033022623	0,919	0,071472429
14	1,6	1,012	0,038326182	0,895	0,083544405
18	7,3	0,0278	0,50081777	0,01865	0,548582003
P referenční		1,076 mW		1,023 mW	

Poslední vzorek v tabulce je již pořízen těsně před vytvrzením, kdy jej již nebylo možné protlačit skrze ústí injekční stříkačky a do Petriho misek jsem se jej snažil stáhnout pomocí špejlí. Jedná se o poslední pořízený vzorek, další již bylo zbytečně pořizovat, neboť nebylo možné vytvořit vodorovný povrch z PDMS v Petriho misce a také již nebylo možné jej zbavit vzduchových bublin. Jeho strukturu lze vidět na obrázku 7.3.



Obrázek 7.3: Značně znehodnocený vzorek

Následně jsem získané hodnoty zpracoval do grafu 7.4. V grafu jsem z důvodu jeho čitelnosti neuvažoval hodnoty posledního (nekvalitního vzorku).



Obrázek 7.4: Závislost útlumu na 1cm na stáří PDMS na vzduchu

Jak je na grafickém vyobrazení vidět, křivka časové závislosti značně kolísá a nelze tedy jednoznačně určit vliv stáří PDMS na jeho kvalitativní vlastnosti. Pro možné upřesnění jsem vynesl lineární spojnice trendu pro obě vlnové délky. Po přihlédnutí k těmto spojnicím se přikláním k názoru, že zatímco na vlnové délce 1550nm útlum mírně stoupá, tak na vlnové délce 1310nm je trend opačný a útlum PDMS s jeho stářím klesá. Avšak netroufám si tyto tvrzení dogmatizovat. Ovšem jasně patrný je vliv užití vlnové délky.

Při podrobnějším zkoumání útlumu na vlnové délce 1310nm je patrné, že se útlum pohybuje v rozmezí 0,43 dB/mm. Maximální naměřená hodnota byla 0,7 dB/mm a nejnižší 0,306 dB/mm. Toto kolísání je výsledkem působení vnějších vlivů při měření a tolerančních chyb přístrojů. Proto je

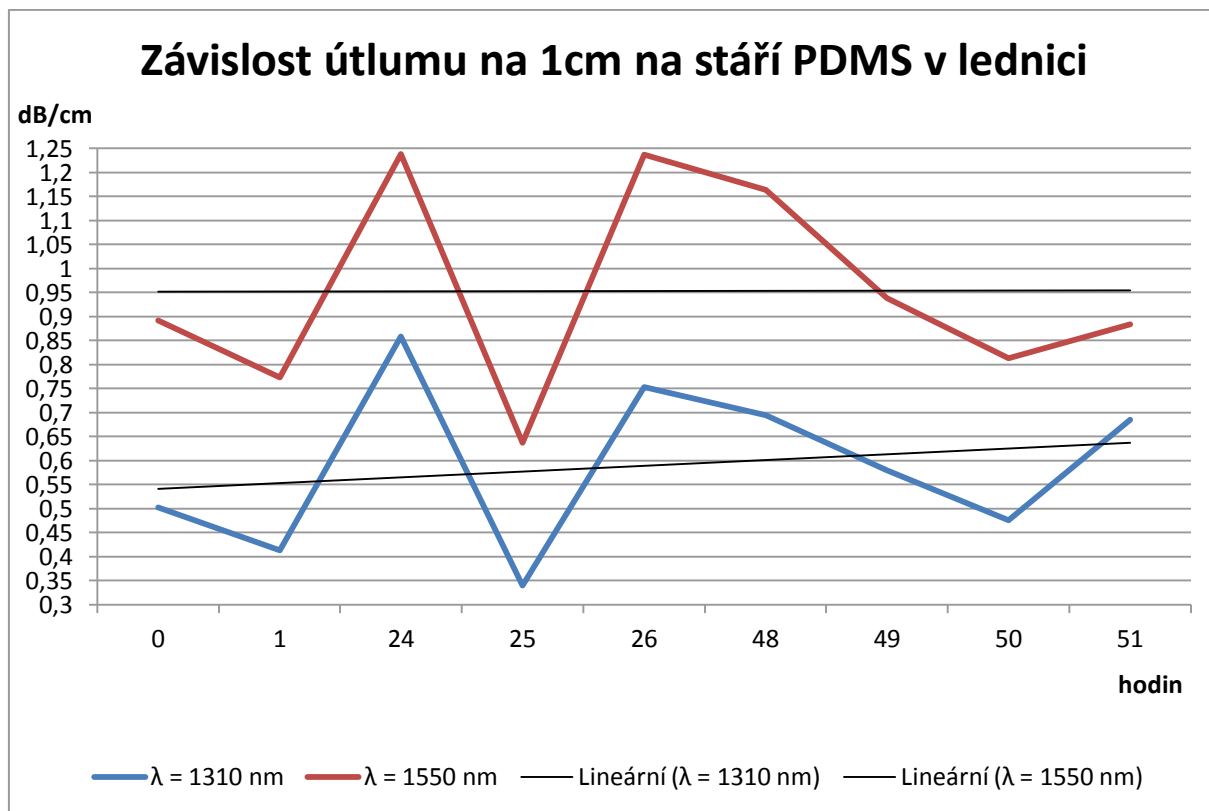
neshledávám významnými z hlediska vlivu na stáří vzorku. Průměrná hodnota byla 0,4 dB/mm. Při porovnání s nekvalitním vzorkem, který byl pořízen jako poslední a nebyl vyobrazen na grafu je vidět, že jeho útlum je téměř 12 krát vyšší než je průměr útlumu vzorků.

Na vlnové délce 1550nm jsou hodnoty útlumu celkově vyšší než u vlnové délky 1310nm. Jeho průměrná hodnota je 0,79 dB/mm. Všechny hodnoty se opět pohybují v rozmezí 0,52 dB/mm. Maximální naměřená hodnota byla 1,09 dB/mm a minimální 0,57 dB/mm. Tomuto kolísání opět neshledávám významným. Při porovnání s nekvalitním vzorkem, který byl pořízen jako poslední a nebyl vyobrazen na grafu je vidět, že jeho útlum je téměř 7 krát vyšší než je průměr útlumu vzorků.

Stejným způsobem jsem postupoval i u vzorků stárnoucích v lednici při 6°C. Vzhledem k prodloužené trvanlivosti takto uložených vzorků jsem pořídil pouze 9 vzorků, ovšem v o to delším časovém spektru. Vzorky byly vždy nality do Petriho misky, zbaveny vzduchových bublin a poté vytvrzeny v kuchyňské troubě. Všechny vzorky jsem odebíral vždy v okolí 24 hodin od posledního odebrání vzorku. Třetí den, již však byl PDMS natolik ztuhlý, že se další vzorky odebrat nedaly. Naměřené a dopočtené výsledky lze vidět v tabulce 7.4.

Tabulka 7.4: *Naměřené a dopočtené hodnoty vzorků stárnoucích v lednici*

Pořadí vzorku	Stáří vzorku v hodinách	Tloušťka vzorku v [mm]	$\lambda = 1310 \text{ nm}$		$\lambda = 1550 \text{ nm}$	
			Detekovaný výkon v [mW]	útlum v [dB] na 1cm délky	Detekovaný výkon v [mW]	útlum v [dB] na 1cm délky
1	0	1,7	0,988	0,50190025	0,879	0,89241099
2	1	1,7	1,003	0,41326443	0,897	0,77317002
3	24	1,1	0,99	0,8581044	0,904	1,23902784
4	25	1,9	1,02	0,33967643	0,918	0,63644754
5	26	1,2	0,994	0,75299351	0,893	1,23779868
6	48	1,2	1,001	0,69451373	0,901	1,16347638
7	49	1,3	1,009	0,57985698	0,917	0,93857654
8	50	1,5	1,013	0,47616615	0,917	0,813433
9	51	1,1	1,009	0,68528552	0,94	0,88402316
P referenční			1,088 mW		1,036 mW	



Obrázek 7.5: Závislost útlumu na 1cm na stáří PDMS v lednici

Na grafu na obrázku 7.5 je opět vidět vztah mezi dobou stárnutí PDMS a jeho útlumem na 1 centimetr délky pokud je při uchovávání podchlazen na 6°C. Opět je dokázáno, že PDMS má nejlepší přenosové vlastnosti na vlnové délce 1310nm. Pro možné upřesnění vlivu stárnutí PDMS jsem vynesl lineární spojnice trendu pro obě vlnové délky. Po přihlédnutí k těmto spojnici se přikláním k názoru, že zatímco na vlnové délce 1550nm je útlum ze statistického hlediska neměnný, tak na vlnové délce 1310nm je trend útlumu PDMS stoupající. Avšak netroufám si tyto tvrzení dogmatizovat.

Při podrobnějším prozkoumání grafu pro vlnovou délku 1310nm lze říci, že průměrná hodnota útlumu je 0,59 dB/mm a rozmezí útlumu je 0,52 dB/mm. Maximální naměřená hodnota byla 0,086 dB/mm a nejnižší 0,33dB/mm. Toto kolísání je výsledkem působení vnějších vlivů při měření a tolerančních chyb přístrojů. Proto je neshledávám významnými z hlediska vlivu na stáří vzorku.

Na vlnové délce 1550nm jsou hodnoty útlumu celkově vyšší než u vlnové délky 1310nm. Avšak pohybují se v rozmezí 0,6 dB/mm a průměrná hodnota je zde 0,95 dB/mm. Maximální naměřená hodnota byla 1,2 dB/mm a minimální 0,64 dB/mm. Toto kolísání opět neshledávám významným.

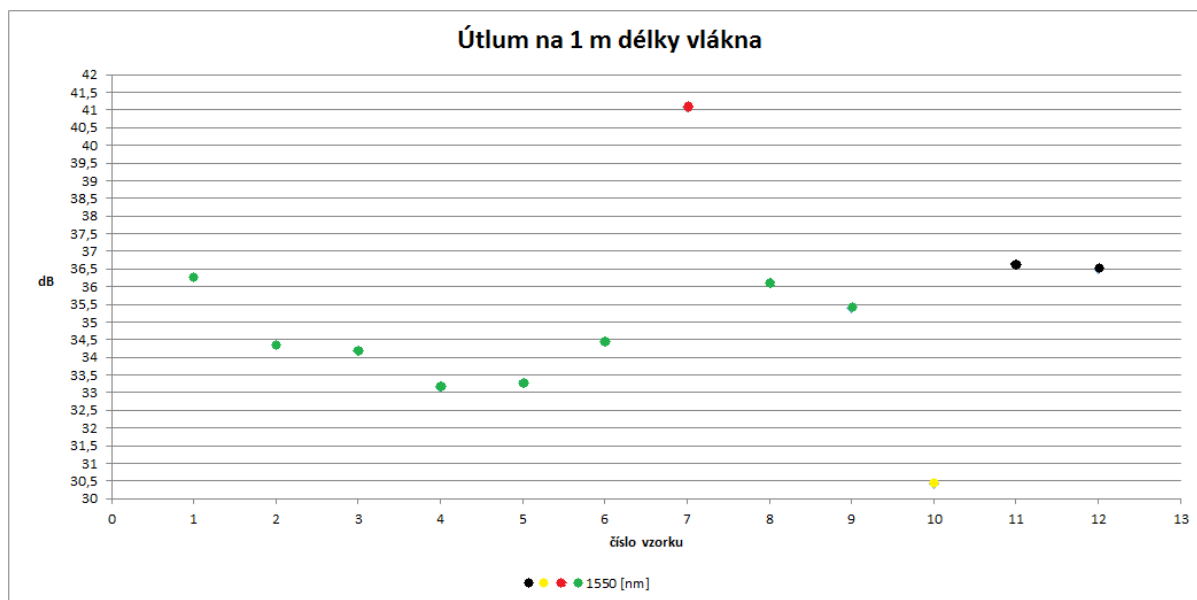
7.3 Měření vzorků získaných gravitační metodou

Tyto vzorky jsem získával pomocí vyrobené improvizované „tažící věže“. Přestože tato metoda byla dosti časově náročná, získal jsem v konečném výsledku 4 vzorky vhodné k proměření. Ty vznikly zkrácením vytaženého vlákna na délku 10 cm v jeho nejlepším úseku. Naměřené a dopočtené výsledky jsou zpracovány v tabulce 7.5.

Tabulka 7.5: *Naměřené a dopočtené hodnoty pro vlákna získaná gravitační metodou*

číslo vzorku	Detekovaný výkon P [μW]	útlum α [dB] na 1 mm délky	útlum α [dB] na 1 m délky
1	12,8	0,03687	36,87
2	13	0,03671	36,71
3	13,4	0,03641	36,41
4	13,6	0,03626	36,26
P referenční	510,8		

Abych porovnal, která z metod vytváření optických vlnovodů je lepší, zdali bužírková nebo gravitační, vyobrazil jsem průměr útlumů vybraných vzorků pro vlnovou délku 1550nm v následujícím grafu na obrázku 7.6:

Obrázek 7.6: *Grafické zobrazení útlumu na 1m vlákna pro různé metody*

Zelené vzorky reprezentují vlákna vytvořená bužírkovou metodou, zatímco černé vzorky jsou vlákna vytvořená metodou gravitační. Lze tedy říci, že bužírková metoda je z hlediska velikosti útlumu lepší, než metoda gravitační. Za zmínku také stojí vzorky označeny červeně a žlutě. Červený vzorek znázorňuje útlum nedokonale vytvrzeného vlákna a žlutý vzorek naopak znázorňuje vlákno nejdéle vytvrzované. Lze tedy s jistotou říci, že nejmarkantnější vliv na kvalitu vlákna z hlediska přípravy má právě doba, po kterou je vlákno vystaveno vysokým teplotám při tvrzení.

Závěr

Diplomová práce je zaměřena na výrobu optických struktur z organokřemičité sloučeniny s názvem polydimetylsiloxan v praxi, jejich měření propustnosti a analýzu vlivu složení optických prvků z PDMS v závislosti na poměru výchozích složek.

V teoretické části této práce se věnuji přiblížení základních principů přenosu světla optickým vlnovodem a jevům zapříčiňující ztráty. Dále pak přibližuji motivaci pro využívání plastových optických vláken a zaměřuji se na popis samotného polydimetylsiloxanu v kombinaci s vytvrzovacím činidlem (Sylgard), který následně využívám ve své praktické části pro tvorbu optických struktur.

V rámci praktické části popisuji nejprve přípravu PDMS pro výrobu optických struktur, v praxi ověřené metody výroby, popis měřicího pracoviště a v závěru vyhodnocení provedených měření.

Pro přípravu jsem zvolil Silicon Elastomer 184 a vytvrzovací činidlo smíchané v doporučeném poměru z datasheetu 10:1 v injekční stříkačce. Směs jsem pak nechal vytřepat v třepačce pro lepší promíchání a zbavení se majoritní části vzduchových bublin. Poté jsem testoval různé metody výroby optických struktur. Jako první byla testována metoda vytlačování skrze zahřátou injekční jehlu na 190°C. Tato metoda se však projevila jako neproveditelná kvůli velkým kapilárním jevům uvnitř jehly. Další metodou bylo plnění gumových bužirek. Tato metoda se ve výsledku jeví jako optimální, a to jak z hlediska kvality vlákna, tak z hlediska její náročnosti na provedení. Největším úspěchem bylo vytvoření 3 metrového vlákna. S touto metodou jsem dále vytvořil několik vzorků dlouhých 10cm a zkoumal vliv stárnutí PDMS na jeho kvalitu. Výsledné hodnoty jsem vynesl do grafu, který poukazuje, že mezi 24 hodinami a 48 hodinami stárnutí není ve výsledném útlumu rozdíl. Extrémy na křivce vytvářejí vzorky, které byly vytvrzeny lépe, než předešlé. U metody „gravitační“ jsem se inspiroval skutečnou tažící věží optických vláken a pokusil se její improvizovanou metodu vytvořit v domácích podmínkách. To se mi z velké části povedlo a taktéž jsem pomocí této metody vytvořil několik vzorků. Nedostatky této metody vidím ve velké náročnosti výrobního technického postupu, kdy je nutné PDMS nejdříve předežhát pro snížení jeho viskozity a až poté nechat jeho vytvrzenou část skapávat věží dolů. Přitom vytažené vlákno má tendenci vytvářet kónusovitý tvar, proto je zde velká část vytvrzeného vlákna odstraněna jako odpad při výrobě. Takto vytvořené vlákno jsem poté porovnal v grafu č. 7.6 s vlákny vytvořenými pomocí bužírkové metody. Je tedy vidět, že útlum je vyšší, tudíž se přikláním spíše k metodě bužírkové.

V další části práce jsem zkoumal vliv stárnutí optických struktur z PDMS na jejich útlum. Vytvořil jsem několik vzorků, které stárly jak na vzduchu, tak za snížené teploty (6°C v lednici) a proměřil jejich úbytek výkonu na vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm. Z grafu č. 7.4 vyobrazujícího stárnutí na vzduchu je vidět, že mnohem nižšího útlumu je dosaženo právě na vlnové délce 1310 nm. Podle lineární křivky trendu, lze usuzovat, že se stářím PDMS útlum mírně stoupá, nicméně vzhledem k omezenému počtu pokusů si netroufám toto tvrzení dogmatizovat. Na grafu č. 7.5 je pak znázorněno stárnutí v lednici se stejným výsledkem. Výhodou uchovávání PDMS v chladu je jeho nesporně delší trvanlivost v tvárném stavu a to o několik desítek hodin. Pokud porovnáme průměrnou hodnotu útlumu PDMS stárnoucího na vzduchu a v lednici, lze dojít k závěru, že vzorky uchovávané v lednici dosahují nižších útlumů.

Jako poslední pokus byla provedena tvorba optického splitteru s dělicím poměrem 50:50. Výsledné útlumy pro jednotlivé větve lze vidět v Tabulce č. 5.2. Pro jeho tvorbu jsem nejprve vytvářel

předlohy z materiálů jako papír, plast a plech, podle kterých bych pak splitter z PDMS vyřezal. Jako nejlepší volba se jevila plastová předloha, avšak ani takto nebyla zajištěna opakovatelnost postupu a celý pokus tak byl čistě informativní. Z výsledků je vidět, že PDMS dokáže dělit světelný paprsek v určitém poměru, avšak útlumy jsou značné a je třeba také dostatečně vylepšit výrobní postup.

Použitá literatura

- [1] KAŠÍK, Ivan a Pavel PETERKA. Optická vlákna – páteř moderních komunikací [online]. , 7 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://www.ufe.cz/sites/default/files/peterka/fjfi/11_kasik_peterka_ccf_opticka_vlakna.pdf
- [2] Optická vlákna v2.1.3. Goro [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [3] BUBNÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. Optoelektrotechnika [online]. Brno, 2015 [cit. 2016-04-25]. ISBN 978-80-88058-20-5. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/Cover.html>
- [4] Absorpce, rozptyl, disperze světla: The Light Fantastic, kap. 11. Fakulta Biomedicínského inženýrství [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <https://www.fbmi.cvut.cz/files/predmety/30/public/Absorpce,%20rozptyl,%20disperze%20sv%204%20Btla.pdf>.....
- [5] PROBLEMATIKA PŘENOSU OPTICKÉHO PAPRSKU OPTICKÝM VLÁKNEM. Brno, 2010. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. JAN ŠPORIK.
- [6] HÁJEK, Martin a Petr HOLOMEČEK. CHROMATICKÁ DISPERZE JEDNOVIDOVÝCH OPTICKÝCH VLÁKEN A JEJÍ MĚŘENÍ [online]. , 6 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.mikrokom.eu/cz/pdf/chrom-disperze.pdf>
- [7] PETERKA, Jiří. Optická vlákna. CHIPweek [online]. 1996, (45/96) [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.earchiv.cz/a96/a645k150.php3>
- [8] JANOVSÝ, MAREK. POF - POLYMEROVÁ OPTICKÁ VLÁKNA. Brno, 2015. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Prof. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc.
- [9] Weinert.A.: Plastic Optical Fibers. Siemens Verlag. Munchen 1999, ISBN 3-89578-135-5
- [10] DOLEŽAL, Ondřej. VYUŽITÍ POF V PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍCH. Brno, 2013. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Prof. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc.
- [11] [29] MOWRER, R. N. Polysiloxanes [online]. Brea: Ameron International Performance Coatings and Finishes Group, 2003. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://ppgamercoatus.ppgpmc.com/psx/docs/presentation_polysiloxanes.pdf
- [12] SEDLÁČEK, Ondřej. Bariérové vrstvy na bázi SiOx. Brno, 2011. Bakalářská práce. VUT v Brně, Chemická fakulta, Ústav chemie materiálů. Vedoucí DP Radek Přikryl.
- [13] The Synthesis of "Bouncing Putty" A Cross-Linked Silicone Polymer [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.wou.edu/las/physci/ch462/BouncingPutty.htm>
- [14] PDMS. Diener Electronic [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <https://www.plasma.com/en/plasmatechnik/lexikon/polydimethylsiloxane/>

- [15] Polydimethylsiloxane. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polydimethylsiloxane>
- [16] Polymery. Vscht [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf>
- [17] Sylgard 184 Silicone Elastomer. Research engineering [online]. USA, 2007 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://research.engineering.ucdavis.edu/ncnc/wp-content/uploads/sites/11/2013/05/Sylgard_184_data_sheet.pdf
- [18] PUDIL, Karel. Navazování optických vláken. Olomouc, 2011. Bakalářská práce. UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI. Vedoucí práce Doc. RNDr. Richard Horák, CSc.
- [19] Výroba optického vlákna. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://panwiki.panska.cz/index.php/V%C3%BDroba_optick%C3%A9ho_vl%C3%A1kna
- [20] Doc.ing.Jaromír LEDERER, CSc. Polymery I [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/POLYMERY2013.pdf>
- [21] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0617-6.
- [22] Kohezní síly v kapalinách – povrchové napětí: kapilarita, povrchové napětí, jevy na rozhraních. VŠB-TU Ostrava: imhfyzikafbi [online]. Ostrava [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://imhfyzikafbi.wz.cz/prednaskyAFpdf/kapilarita.pdf>
- [23] REICHL, Jaroslav a martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky: Kapilarita [online]. 2006 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/643-kapilarita#>
- [24] MM Průmyslové spektrum: Rozsviťte světla. 2013, (4). Str. 76.
